



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ANTTI-VILLE ITÄSALO

PNEUMAATTISEN LIIKEALUSTAN SUUNNITTELU

Diplomityö

Tarkastaja: professori Asko Ellman
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, Kone- ja
Materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvosto
kokouksessa 27. marraskuuta 2009

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

ITÄSALO, ANTTI-VILLE: Pneumaattisen liikealustan suunnittelu

Diplomityö, 75 sivua

Toukokuu 2010

Pääaine: Konstruktiotekniikka

Tarkastaja: professori Asko Ellman

Avainsanat: Liikealusta, virtuaaliympäristö, simulaattori, pneumatiikka, Stewart.

Tässä työssä suunniteltiin pneumaattinen liikealusta Tampereen teknillisen yliopiston konstruktiotekniikan virtuaalilaboratorioon. Virtuaaliympäristön tarkoituksena on tuottaa sellaisia aistimuksia, että hän kokee olevansa jossakin muualla. Sitä, kuinka hyvin ihminen uppoutuu virtuaaliympäristöön, kutsutaan immersioiksi. Virtuaalilaboratoriossa oli immersion toteuttamiseen valmiudet 3D-kuvalle, paikannukselle ja haptiikkahansikkaalle. Virtuaalilaboratoriossa on tarkoituksena tutkia liikkuvia työkoneita ja ohjaamoita. Jotta immersio olisi mahdollisimman hyvä työkoneita ajatellen, tarvitaan liikealusta tuottamaan työkoneen liikkeitä. Työkoneen kuljettajalle on erittäin tärkeä tuntee koneen liiketuntuma. Tässä työssä esimerkkityökoneena on Sandvikin kaivoskauhakuormaaja Toro.

Suunnittelun lähtökohtana oli, että liikealustaa pitää pystyä käyttämään TTY:n konstruktiotekniikan virtuaalilaboratoriossa sekä Seinäjoen ammattikorkeakoulun virtuaaliympäristössä. Liikealustan piti olla kevyt ja helposti liikuteltava. Kuljetuksen aikana sen piti mahtua pakettiautoon. Suunnittelussa erittäin tärkeää oli myös turvallisuus, koska laitteen kyydissä on ihminen. Liikealustasta haluttiin mahdollisimman edullinen.

Pneumatiikka valittiin käyttöenergiaksi, koska toimilaitteina haluttiin käyttää ilmalihaksia. Ilmalihasten etuna on suurin tunnettu voima/paino suhde. Lihakset ovat kevyitä ja edullisia. Haasteena on toimilaitteen ohjaus epälineaarisuuden takia.

Suunnittelun tuloksena saatiin Stewart-tyyppinen liikealusta, jossa on kuusi vapausastetta. Ohjaus toteutettiin avoimena, jolloin takaisinkytkentää ei tarvita. Lihaksen toiminta mallinnettiin, jotta toimilaitteen epälineaarisuus hallittaisiin ohjauksessa. Valmistuksessa käytettiin paljon standardiosia, jolloin kustannukset jäivät pieniksi. Liikealusta rakennettiin itse.

Valmiilla liikealustalla toteutettiin kiihtyvyyssmittauksia ja käytettävyystestejä. Mittausten ja testien perusteella arvioitiin liikealustan soveltuvuutta liikkuvan työkoneen simulaattorikäytössä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanics and Design

ITÄSALO, ANTTI-VILLE: Design of Pneumatic Motion Platform

Master of Science Thesis, 75 pages

May 2010

Major: Construction technics

Examiner: Professor Asko Ellman

Keywords: Motion platform, virtual environments, pneumatic, Stewart.

In this work was designed a pneumatic motion platform for Virtual Laboratory of Tampere University of Technology Department of Mechanics and Design. In virtual reality purpose is to manipulate human senses so that user believes to be somewhere else. How well a virtual reality system can manipulate senses is called immersion. In Virtual Laboratory immersion is produced with 3D-picture, tracking and haptic glove. The purpose of Virtual Laboratory is to research mobile machines and cockpits. Good immersion with mobile machines needs a motion platform to produce the movement of the machine. Feeling the movements of the machine is important for the driver of the machine. In this work the machine used as an example is Sandvik's Toro.

Basis of the design was to able use the motion platform in TTY's Virtual Laboratory and in virtual CAVE of Seinäjoki University of Applied Sciences. The motion platform had to be light and easy to move. During the transportation it should fit in to a van. The motion platform had to be as affordable as possible. In the design safety was very important because there is a human on it.

In this work fluidic muscles were used as actuators because the biggest known force/weight relationship. The power source chosen was pneumatic because of the actuators. Muscles are light and affordable. Problematic with the actuators is non-linear behaviour.

The result was a Stewart motion platform with six degree of freedom. Control of the motion platform was chosen to be open-loop because it doesn't need feedback. Because of the non-linearity of the actuators they were modelled mathematically and these mathematic models was used to controlling the motion platform. In manufacturing the motion platform lots of standard parts were used. The motion platform was built by self.

With the motion platform there were taken acceleration measurements and made usability tests. The measurements and the usability tests results were used to validate the suitability of the motion platform used with mobile machine simulator.

ALKUSANAT

Diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston konstruktitekniikan laitoksella. Työn aiheena oli suunnitella pneumaattisilla ilmalihaksilla toteutettu liikealusta tutkimusryhmän käyttöön. Suunnittelutyö oli erittäin mielenkiintoista ja haastavaa. Sain perehtyä moneen osa-alueeseen työn aikana. Tarkastajana työssä toimi professori Asko Ellman, jota haluan kiittää tästä työstä, tuesta ja työn ohjauksesta.

Haluan kiittää ystäviäni, työtovereita ja sukulaisiani kannustuksesta ja mielenkiinnosta työtäni kohtaan.

Erityiskiitokset haluan esittää avopuolisolleni Kirsille suunnattomasta tuesta.

Omistan tämän työn kaksospoikieni Leon ja Eeliksen muistolle.

Tampereella 16.5.2010

Antti-Ville Itäsalo

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| Tiivistelmä | 2 |
| Abstract | 3 |
| Alkusanat | 4 |
| Termit ja niiden määritelmät | 7 |
| 1. Johdanto | 9 |
| 2. Virtuaaliympäristö ja liikkeen tuottaminen..... | 11 |
| 2.1. Virtuaaliympäristö..... | 12 |
| 2.2. Liikkeen aistiminen..... | 15 |
| 2.3. Simulaattorityypit..... | 15 |
| 2.4. Simulaattorin toiminta..... | 17 |
| 2.5. Liikealustan ohjaus | 17 |
| 2.5.1. Ohjaussignaalin suodatus..... | 19 |
| 2.5.2. Käänteiskinematiikka | 19 |
| 2.6. Liikealustan rakenne | 22 |
| 2.7. Liikealustan toimilaitteet..... | 24 |
| 2.7.1. Hydraulikka | 25 |
| 2.7.2. Sähkötoimilaitteet | 25 |
| 2.7.3. Pneumatiikka | 26 |
| 3. Liikealustan suunnittelu | 31 |
| 3.1. Vaatimuslista..... | 31 |
| 3.2. Käyttöenergian ja toimilaitteen valinta | 32 |
| 3.3. Rakenteen valinta | 32 |
| 3.4. Liikealustan mitoitus..... | 34 |
| 3.4.1. Tilan mittojen määrittäminen | 35 |
| 3.4.2. Liikealustan kuorma ja massakeskipiste..... | 35 |
| 3.4.3. Lihasten minimipituus ja kiinnitys | 36 |
| 3.4.4. Perusosan rakenteen valinta..... | 37 |
| 3.4.5. Liikkuvan osan rakenteen valinta | 40 |
| 3.4.6. Liikkuvan osan mitoitus | 43 |
| 3.4.7. Matemaattinen malli | 46 |
| 3.4.8. Kiinnityspisteiden optimointi ja kuormitusten tarkastelu..... | 51 |
| 3.5. Pneumatiikan suunnittelu ja mitoitus | 53 |
| 3.5.1. Toimilaitteiden venttiilien valinta..... | 54 |
| 3.5.2. Pneumatiikkaletkujen ja suodattimen valinta | 55 |
| 3.6. Liikealustan ohjaus | 56 |
| 3.7. Viimeistely liikealustalle..... | 57 |
| 3.8. Valmis liikealusta..... | 57 |
| 4. Liikealustan mittaukset | 61 |
| 4.1. Käytettävyydesti | 61 |
| 4.2. Kiihtyvyydsmittaukset | 62 |

| | | |
|--------------|------------------------------|----|
| 4.2.1. | Mittauslaitteisto | 62 |
| 4.2.2. | Mittaus kohteet | 62 |
| 4.2.3. | Mittausdatan käsittely | 63 |
| 4.2.4. | Mittauksen tulokset..... | 64 |
| 4.2.5. | Mittauksen yhteenveto..... | 70 |
| 5. | Yhteenveto | 72 |
| Lähteet..... | | 74 |

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

| | |
|--------------------|--|
| ° | Aste |
| 3D | Kolmiulotteinen (eng.three dimensional) |
| [A], [B], [C], [D] | Koordinaatisto A, B, C, D |
| $\{A_i\}$ | i:n kiinnityspiste liikkuvassa osassa |
| $\{B\}$ | Liikealustan perusosan koordinaatiston origo |
| $\{K_i\}$ | i:n kiinnityspiste perusosassa |
| $\{P\}$ | Liikealustan liikkuvanosan koordinaatiston origo |
| A | Yleinen kiertomatriisi |
| ${}^C_D A$ | Kääntömatriisi koordinaatiston [C]:n ja [D] välillä |
| b | Kuidun pituus |
| CAD | Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu |
| dl_i | Lihaksen sisäseinämän etäisyyden muutos |
| dL | Lihaksen pituuden muutos |
| ds_i | Alue vektori |
| dV | Tilavuuden muutos |
| dW_{in} | Lihakseen tehty työ |
| dW_{out} | Lihaksen tekemä työ |
| D | Lihaksen halkaisija |
| F_i | i:n lihakseen kohdistuva voima |
| F | Voima |
| F | Voimamatriisi sisältäen kaikkien ilmalihasten voimakomponentit |
| FEM | Elementtimenetelmä (Finite Element Method) |
| G | Painovoiman vektori |
| GP | Liikealustan liikkuvanosan painopiste |
| $k_{1,2,3}$ | Kertoimet kolmannen asteen polynomifunktiossa |
| K | Matriisi momenttien ja voimien suunnista |
| l_i | i:n lihaksen pituus |
| L | Lihaksen kumiosan pituus |
| ${}^B M_g$ | Momentin vektori |
| p_m | Mitattu paine lihaksen sisällä |
| p_{max} | Maksimaalinen lihakselle saatavilla oleva paine |
| P | Absoluuttinen paine, bar, 1 bar = 10^5 Pa |
| P' | Ylipaine lihaksessa |
| P_0 | Ympäristön paine |
| Pa | Kappeleen piste |

| | |
|--------------------------|--|
| r | Pisteen Pa :n paikkavektori $[A]$:n koordinaatistossa |
| r' | Pisteen Pa :n paikkavektori $[C]$:n koordinaatistossa |
| R | Siirtovektori koordinaatistosta $[A]$:sta $[B]$:hen |
| R' | Siirtovektori koordinaatistosta $[A]$:sta $[B]$:hen |
| \mathbf{R} | Vektoreiden \mathbf{F} ja \mathbf{G} pistetulo |
| S_i | Koko kumin sisäpinta-ala |
| u | Pisteen Pa :n paikkavektori $[B]$:n koordinaatistossa |
| u' | Pisteen Pa :n paikkavektori $[D]$:n koordinaatistossa |
| V | Mittayksikkö jännitteelle |
| α | Liikealustan laskennassa käytetty x-akselin kiertymä |
| β | Liikealustan laskennassa käytetty z-akselin kiertymä |
| γ | Liikealustan laskennassa käytetty y-akselin kiertymä |
| ϕ | Ilmalihaksen kuidun asennuskulma |
| ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 | Kiertymä X, Y, Z-akselin ympäri |

1. JOHDANTO

Tietokoneiden laskentateho on kasvanut viime vuosina nopeasti. Laskentateho on saavuttanut tason, jolla voidaan reaaliajassa laskea monikappaledynamiikkaa ja simuloida isoja kokonaisuuksia kerralla. Tästä syystä erilaiset virtuaaliympäristöt ja simulaattorit ovat yleistyneet koneiden ja järjestelmien kehityksessä ja suunnittelussa.

Perinteiseen suunnitteluprosessiin on kuulunut prototyyppien valmistus. Se on aikaa vievää ja kustannuksiltaan kallista. Virtuaalitekniikka ja simulaattorit ovat mahdollistaneet rakenteiden tarkastelun jo ennen kuin valmistus on alkanut. Näin säästetään aikaa ja rahaa. Samalla voidaan tehdä useampia iterointikiertoja suunnittelussa ja prototyypin välillä, kun iteroinnin tulos nähdään virtuaaliympäristössä.

Liikkuvilla koneissa on tärkeää päästä tuntemaan miltä laite tuntuu ja millainen näkymä ohjaamosta on itse käytön aikana. Oikealla tuntumalla kuljettaja havaitsee koneen liikkeitä ja pystyy tämän seurauksena tekemään oikeita ratkaisuja ohjattaessa konetta. Virtuaaliympäristön ja liikealustan avulla tämä on mahdollista jo ennen varsinaista prototyyppiä.

Lentokonesimulaattori on tyypillinen esimerkki simulaattorista. Siinä ohjaamo on kiinnitetty liikealustan päälle ja ikkunat korvattu näytöillä. Sillä lentäjät voivat harjoitella turvallisesti eri tilanteita. Liikealusta tehtävänä on simuloida koneen liikkeitä. Visualisoinnin ja liikealustan yhteistyö on tärkeää. Jos visualisointi ja liikealusta ovat epätahdissa, voi kuljettajalle tulla epämieluisen tunne eli simulaattorisairaus. Toisaalta sopivalla visualisoinnilla voidaan myös parantaa liikkeen tuntumaa.

Virtuaaliympäristön ja liikealustan yhdistelmällä voi tutkia myös käytettävyyttä. Ennen varsinaista laitteen valmistusta voidaan tutkia esimerkiksi hytin toiminnallisuutta. Yritysten on vaikea saada tietoa miten kuskit oikeasti käyttävät konetta käyttöympäristössään ja miten kuljettavat mahdollisesti stressaantuvat työstään. Ja onko laite hallittavissa myös ääritilanteissa. Simulaattorit antavat hyvän tilaisuuden tutkia käyttäjakeskeisiä asioita turvallisesti sisätiloissa.

Tässä työssä keskitytään pääasiassa TTY:n konstruktitekniikan laitoksen virtuaaliympäristöön, jota on mahdollista käyttää tuotekehityksessä, koulutuksessa, testauksessa tai tutkimuksissa. Tavoitteena on suunnitella ja rakentaa mahdollisimman monipuolinen ja edullinen liikealusta, jota voisi käyttää mahdollisimman monessa

sovelluksessa ja paikassa. Liikealustan pitää olla myös helposti liikuteltavissa. Valmistusmenetelmien pitää olla mahdollisimman yksinkertaisia ja käytettävien osien mielellään sarjatuotannollisia standardiosia, jotta osien saanti on helppoa. Suunnittelussa huomioidaan laitteen käyttövalmius myös Seinäjoen ammattikorkeakoulun CAVE-ympäristössä. Työssä esimerkki ajoneuvona on kaivoskauhakuormaaja Sandvikin Toro, jonka ohjauslaitteet ja penkki tullaan kiinnittämään liikealustaan.

2. VIRTUAALIYMPÄRISTÖ JA LIIKKEEN TUOTTAMINEN

Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) konstruktitekniikan laitoksen virtuaalilaboratoriossa tutkitaan ihmisen ja koneen välisiä rajapintoja, esimerkiksi laitteen käytettävyyttä. Keskeisenä tutkimuskohteena ovat liikkuvat työkoneet ja niiden ohjaamot. Jotta kuljettajia eli käyttäjiä voitaisiin tutkia mahdollisimman oikeantuntuksessa ympäristössä, pitää luoda mahdollisimman aito ympäristö käyttäjälle. Yhtenä keskeisenä osana on liikkeen tuottaminen varsinkin liikkuvissa työkoneissa. Työkoneen kuljettaja saa paljon tietoa penkin välityksellä ajotapahtumista. Tämän saman tunteen tuottaminen olisi erittäin tärkeää, jotta kuljettajia voidaan tarkastella virtuaaliympäristössä.

Koneen käyttäjien tutkiminen oikeissa olosuhteissa on hyvin tärkeää, koska silloin nähdään miten kuljettaja toimisi vastaavasti oikeassa ohjaamossa. Voidaan havaita käyttäkö hän laitteita oikein, jos tulee jokin yllättävä tilanne. Tai toimiiko suunniteltu ohjain koneen käyttöympäristössä, esimerkiksi kosketusnäyttö tarisevässä ympäristössä. Samalla voidaan tarkkailla kuljettajaa ja hänen kuormitustasoaan.

Virtuaaliympäristöä voidaan käyttää myös tuotekehityksessä hyväksi. Virtuaalimaailmassa on helppo muokata hytin ominaisuuksia ja toimilaitteiden paikkaa. Näin käyttäjä voi itse määritellä, mikä olisi ohjainten hyvä sijainti. Virtuaaliympäristössä on myös helppo muokata itse ohjaamo ja katsella, millainen näkymä koneesta on. Suunnitteluprosessia helpottaisi, jos voisi ajaa laitetta, joka on vasta piirustuksina tietokoneella. Ja siitä saisi käyttäjäkokemuksia ennen kuin ensimmäistä prototyyppiä olisi valmistettu. Tämä säästäisi aikaa ja rahaa.

Näiden syiden takia olisi tärkeää tuottaa kuljettajalle samanlainen liike kuin oikeassa koneessa. Virtuaaliympäristön rinnalle siis tarvitaan liikealusta.

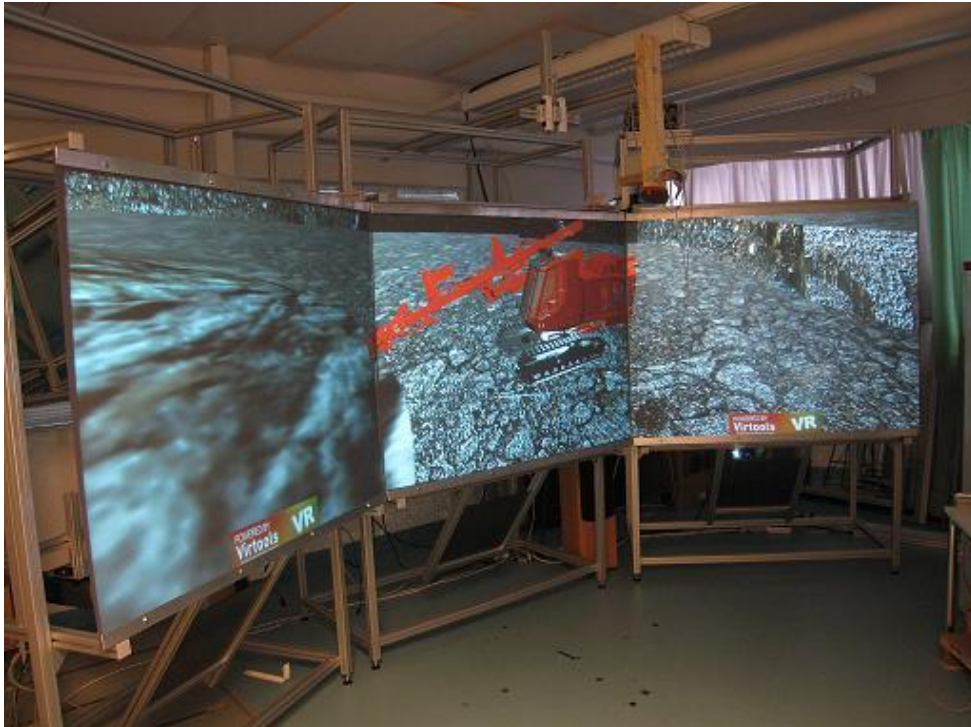
Tässä työssä esimerkkinä liikkuvana työkoneena on Toro (Kuvassa 2.1). Toro on Sandvikin valmistama pyöräkuormaaja kaivosoloihin. Kuten kuvasta nähdään, laite on suunniteltu operoimaan pienissä ja ahtaissa luolissa. Laite on erittäin matala ja nivelohjattu. Ohjaamo on laitteen keskellä ja sisällä istutaan sivuttaan. Kuljettaja joutuu kääntämään päätään vasemmalle ajettaessa eteenpäin ja vasemmalle kun ajetaan taaksepäin.



Kuva 2.1 Sandvik Toro, pyöräkuormaaja.

2.1. Virtuaaliympäristö

TTY:n konstruktitekniikan laitoksella sijaitsee kolmen näyttöpinnan mini-cave virtuaaliympäristö. Kuvassa 2.2 nähdään kolme näyttöpintaa ja niiden sijoitus. Sivulla olevat näyttöpinnat sijaitsevat 45° kulmassa keskimmäiseen nähden. Näyttöpintojen tarkoituksena on tuottaa 3D näköaistimus.



Kuva 2.2 TTY:n konstruktitekniikan laboratorio.

Näyttöpintojen kehiöt ovat valmistettu alumiiniprofiilista ja itse näyttöpinta on taustaheijastusmuovilevy. Kuva heijastetaan kahden peilin kautta näyttöpinnalle. Näin

heijastusetäisyys saadaan lyhyemmäksi. Ilman peilejä videoprojektorin heijastusmatka olisi noin kolme metriä. Nyt etäisyys jää noin metriin. Projektorina on InFocus:n stereovideoprojektori. Projektori kykenee 120Hz päivitystaajuuteen. Tämä mahdollistaa 3D-kuvan tuottamisen näyttöpinnoille. Näyttöpintojen resoluutio on 800 X 600 pistettä. Tutkimusryhmällä on myös mahdollista käyttää Seinäjoella sijaitsevaa viiden seinän virtuaaliympäristöä (kuva 2.3). 3D-mallit ovat laitteistoihin yhteensopivat.



Kuva 2.3 Seinäjoen Cave-ympäristö.

Virtuaalimallien tekoon ja esitykseen käytetään Virtools-ohjelmaa. Ohjelmalla on hyvin nopea tehdä erilaisia virtuaalimalleja. Ohjelmaan on myös helppo tuoda suoraan CAD-malleja. Toiminnallisuuksien teko malleihin on myös melko nopeaa.

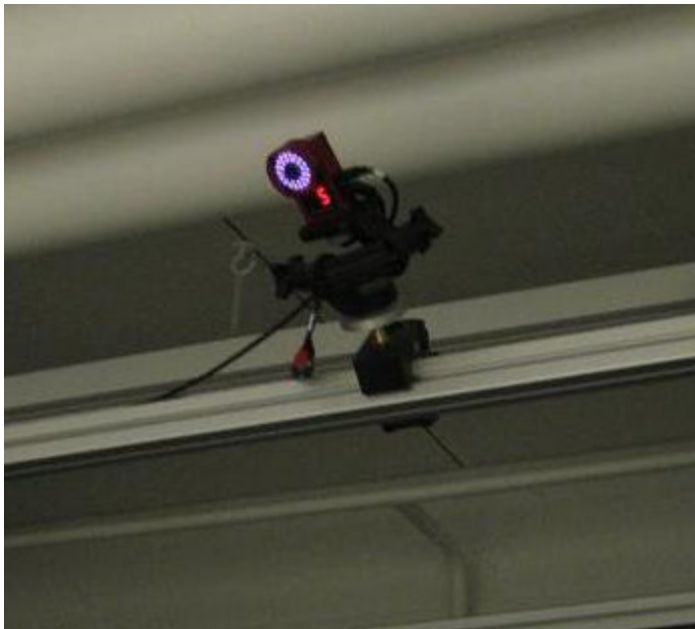


Kuva 2.4 3D-aktiivistereo lasit.

3D-kuva tuotetaan kuvassa 2.4 olevan aktiivistereolasien avulla. Laseissa on lcd-suljin oikean ja vasemman silmän edessä. Projektori piirtää molemmille silmille kuusikymmentä kuvaa sekunnissa vuorotellen. Kun piirretään kuvaa vasemmalle silmälle näyttöpinnalle, silloin oikean silmän edessä oleva suljin on kiinni ja vasen on auki, jotta se näkisi kuvan. Seuraava kuva näyttöpinnalle piirretään oikealle silmälle. Silloin vasemman silmän suljin on kiinni ja oikea auki. Näin nopeasti tapahtuvaa auki-

kiinni tapahtumaa silmä ei erota ja se ei häiritse katsojaa. Aivot kuitenkin saavat käsityksen eri kuvista ja näin muodostavat kolmiulotteisen vaikutelman.

Jotta virtuaaliympäristö voidaan piirtää käyttäjälle oikeasta kulmasta kaikille kolmelle eri näyttölaitteeseen, tarvitaan paikannus. Paikannus on toteutettu kamerapaikannuksella. Kuvassa 2.5 näkyvä infrapunakameran ympärillä on infrapunaemitteri. Infrapunavalon osuessa heijastavaan materiaaliin, kuten kuvassa 2.6 olevassa 3D-laseissa oleviin heijastinpalloihin, se heijastuu takaisin kameraan. Tämä havaitsee heijastinpallot pisteinä. Laboratoriossa on sijoitettu neljä infrapunakameraa näyttöpintojen yläosaan ja kaksi kameraa alaosaan. Näin heijastinpallo pisteet havaitaan monesta kamerasta ja niiden paikka voidaan laskea näyttöpintojen välistä. Näin saadaan selville pään paikka ja orientaatio.

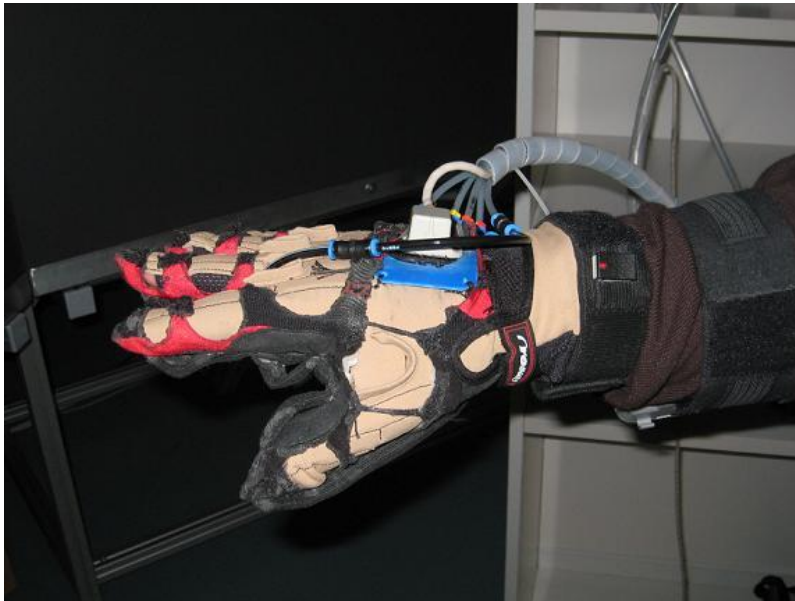


Kuva 2.5 Paikannuksen infrapunakamera.



Kuva 2.6 3D-lasit, jossa heijastinpalloja.

TTY:n virtuaaliympäristö on varustettu myös kuvassa 2.7 näkyvällä haptiikka hansikkaalla. Haptiikka hansikas on tutkimusryhmän omien tutkimuksen tuloksena syntynyt.



Kuva 2.7 TTY:n kehittämä tuntopalaute hansikas.

Haptiikka-hansikkaalla voidaan tuntea virtuaalimaailman esineitä tai pintoja. Hansikkaalla voidaan myös olla vuorovaikutuksessa virtuaaliympäristön kanssa, esimerkiksi painaa nappuloita virtuaalisessa ohjauspaneelissa.

Hansikas toimii paineilmalla. Käden koskettaessa virtuaaliesinettä, paineilmaa ohjataan sormien alla oleviin ilmalihaksiin. Ilmalihakset tuottavat voimaa ja kääntävät sormia ylöspäin. Samalla sormet tuntevat ilman paineen kosketuksena.

2.2. Liikkeen aistiminen

Ihmisellä on ympäri kehoa, lihaksistossa ja ihossa, tuntoelimiä, jotka havaitsevat liikkeen kiihtyvyyden ja nopeuden. Lisäksi ihmisen korvassa on tasapainoelin, simpukka, joka havaitsee missä asennossa ihminen on ja mihin päin kallistunut. Näiden kahden aistimuksen lisäksi silmät ovat tärkeä elin aivoille, kun se määrittää asemaa tai orientaatiota ihmisen sijainnista [1]. Liikettä ihmiselle virtuaaliympäristössä tuotetaan liikealustalla.

2.3. Simulaattorityypit

Liikealustoja on hyvin monenlaisia. Niitä käytetään monissa erilaisissa virtuaali- ja simulaattoriympäristöissä, kuten koulutus-, tutkimus-, tuotekehitysympäristöissä ja

huvipuistolaiteissa. Yleisesti tunnettu esimerkki simulaattoreista on lentokonesimulaattori. Kuvassa 2.8 on Boeing 737-simulaattori. Liikealustan päälle on rakennettu ohjaamo, jonka sisällä on alkuperäisen lentokoneen hallintalaitteet. Oikeiden ikkunoiden tilalla on näytöt.



Kuva 2.8 Boeing 737-simulaattori liikealustalla [2].

Liikealustat ovat yleistyneet voimakkaasti. Viihdekäytössä monissa huvipuistoissa on useita simulaattoreita, jotka hyödyntävät liiketuntumaa, luodakseen realistisen ja mukaansa tempaavan tunteen.

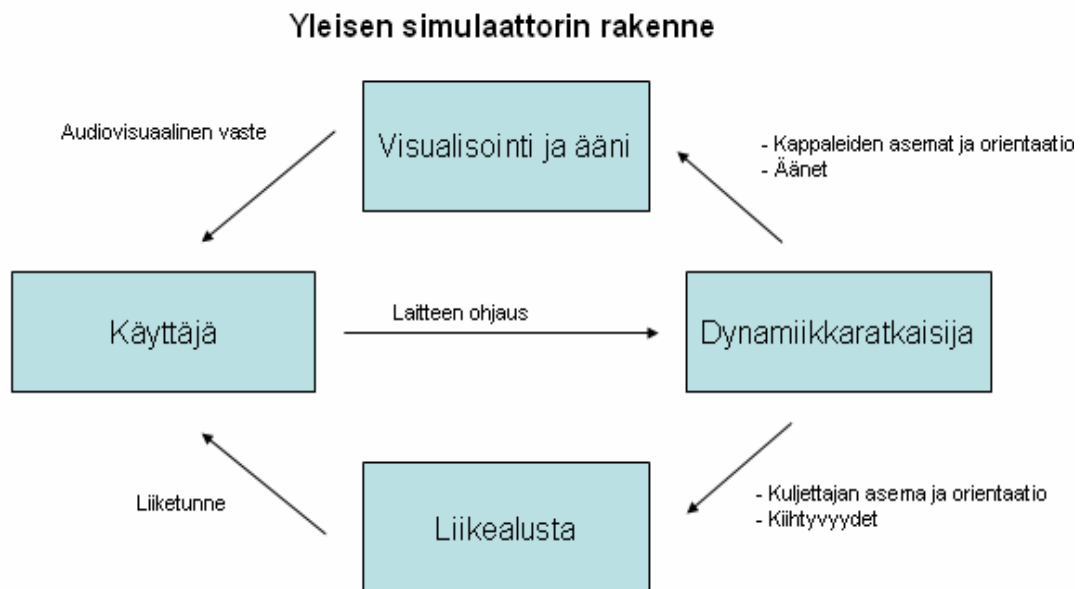
Teollisuudessa liikealustoja on yleensä koulutus- ja tuotekehityssimulaattoreissa. Koulutussimulaattorit ovat olleet jo pitkään käytössä, mutta viime vuosina niihin on yhdistetty liikealusta. Näin voidaan kouluttaa uusia kuljettajia turvallisesti ja tehokkaasti ja he saavat oikean tunteen koneesta. Kuljettajilla on myös mahdollista kokeilla ääritilanteissa toimimista.

Virtuaalituotekehitysympäristössä liikealustan tärkein ominaisuus on todellista konetta vastaavan liiketuntuman luominen. Jo prototyypivaiheessa voidaan testata, miltä laite tuntuu ja miten se käyttäytyy. Samalla voidaan tarkastella kuljettajaan kohdistuvia voimia ja ovatko ne standardeissa sallittuja arvoja.

Tutkimus- ja koulutusympäristöissä tärkeintä on tuottaa liiketuntuma yhdessä visualisoinnin kanssa samaan aikaan. Jos kuva ja liike menevät eri tahtiin, tulee helposti simulaattorisairaus eli pahoinvointia. Liikkuvien työkonoiden ohjauksessa liiketuntumalla on erittäin suuri merkitys. Koneen simuloinnissa pitää aina miettiä mitkä liikkeet ovat tärkeimpiä ja millä ei ole niin suurta merkitystä.

2.4. Simulaattorin toiminta

Kuvasta 2.9 näkyy yleisen simulaattorin toimintaperiaate. Käyttäjä ohjaa konetta hallintalaitteilla, joista kulkeutuu tieto dynamiikkaratkaisijalle. Dynamiikkaratkaisija on tärkeä osa simulaattoria, koska se laskee kappaleiden asemat ja orientaatiot. Laskennan tulisi tapahtua mahdollisimman reaaliajassa, ettei tulisi viivettä visualisointiin tai liikealustan liikkeisiin. Kappaleiden asemat ja orientaatiot lähetään visualisoitsijalle ja sieltä kuva ja ääni välittyvät käyttäjälle näyttöjen ja kaiuttimien kautta. Liikealustalle ohjautuu kuljettajan asema ja orientaatio. Liikealusta liikkuu tarpeen mukaan ja näin välittää liiketuntuman käyttäjälle.

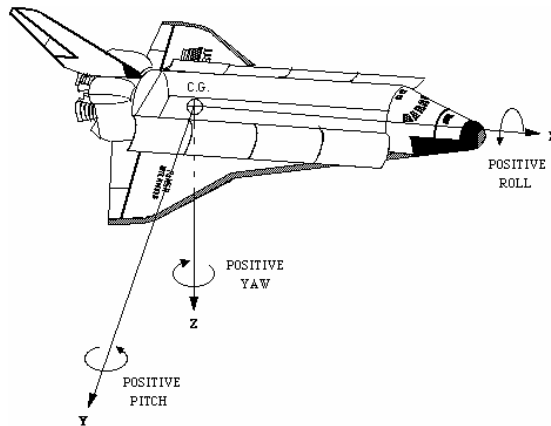


Kuva 2.9 Simulaattorin toimintaperiaate [3].

Toro-simulaattorissa käytetään Mevea Oy:n tekemää dynamiikkaratkaisijaa ja visualisointi toteutetaan Virtools-ohjelmalla.

2.5. Liikealustan ohjaus

Liikealusta saa tiedot dynamiikkaratkaisijalta, kuten kuvassa 2.9 Kiihtyvyydet muutetaan paikka- ja kulmatiedoiksi. Liikealustan ohjauksessa usein käytetään oikean käden koordinaatistoa. Kuvassa 2.10 nähdään miten koordinaatiston oikean käden akselit asetetaan koneeseen. Eli X-akseli koneen menosuuntaan, Y-akseli oikealle ja Z-akseli alaspäin. Käytetään myös Y-akseli vasemmalle ja Z-akseli ylös.

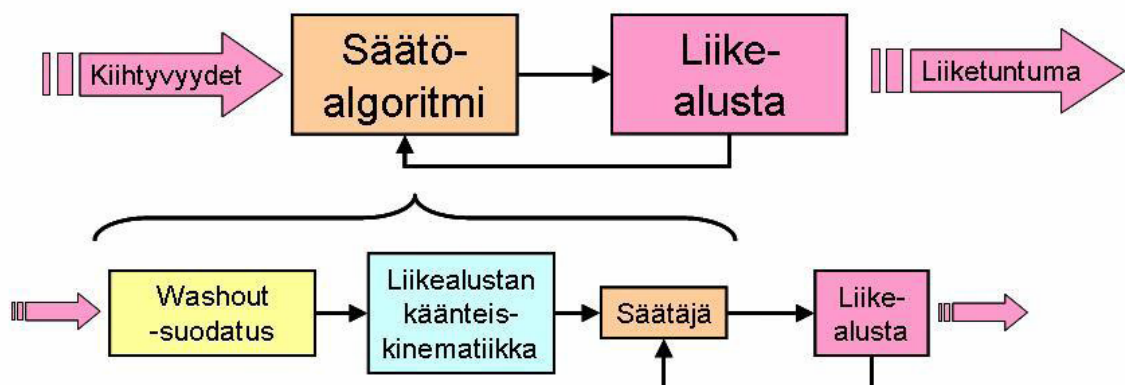


Kuva 2.10 Oikean käden koordinaatisto [4].

Liikealustan liikkeistä puhuttaessa käytetään yleisesti seuraavia nimityksiä

- translaatioliike X-suuntaan: surge
- translaatioliike Y-suuntaan: sway
- translaatioliike Z-suuntaan: heave
- kiertymä X-akselin ympäri: roll
- kiertymä Y-akselin ympäri: pitch
- kiertymä Z-akselin ympäri: yaw

Kiihtyvyyksiä tai asemointia ei voida kuitenkaan suoraan toistaa liikealustalla. Tämä johtuu liikealustan liikealueen rajallisuudesta. Esimerkiksi lentokoneen kiihdyttäminen täyteen vauhtiin kiitoradalla vaatii lentokoneen liikkuvan tietyn matkan. Jos tämä toteutettaisiin suoraan liikealustalla, joutuisi se liikkumaan saman matkan. Tästä syystä ohjaussignaalia pitää käsitellä sopivaksi. Liikealustojen ohjauksessa tyypillinen ratkaisu on säätöalgoritmi. Säätöalgoritmillä muutetaan dynamiikkaratkaisijan kiihtyvyydet liikealustalle sopivaksi. Kuvassa 2.11 nähdään kaaviokuva säätöalgoritmista.



Kuva 2.11 Liikealustan ohjauksen kaaviokuva [3].

2.5.1. Ohjaussignaalin suodatus

Ohjaussignaalin suodatus on hyvin simulaattorikohtaista, riippuen siitä mitä konetta tai laitetta simuloidaan. Miten ja mitkä liikkeet halutaan toteuttaa liikealustalla. Esimerkiksi auton pitkä kiihdytys on pientä kiihtyvyyttä tärinään verrattuna. Ja miten auton pitkä kiihdytys toteutetaan liikealustalla, jolla on rajallinen liikematka. Suodatustapaan vaikuttaa myös liikealustan vapausasteiden määrä ja liikealustan rakenne.

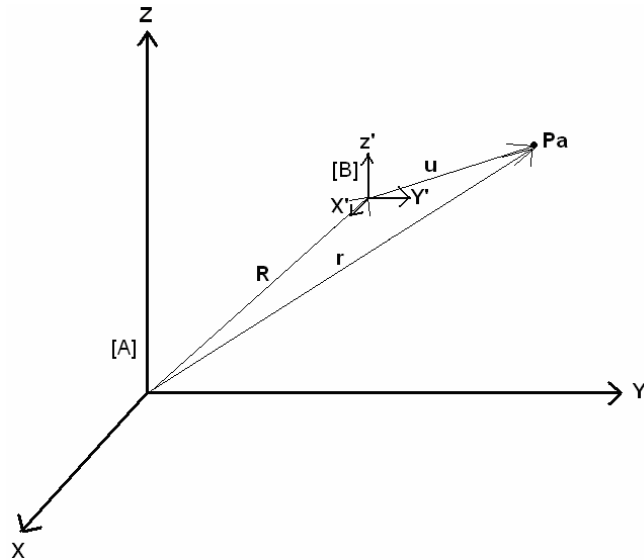
Dynamiikkaratkaisijan tuottama kiihtyvyyssignaali suodatetaan tyypillisesti washout-suodatuksella. Washout-suodatuksen tarkoituksena on erotella korkeataajuiset ja matalataajuiset kiihtyvyydet signaalista. Tämä siksi, koska nämä kiihtyvyydet toteutetaan erilailla liikealustalla. Washout-suodatuksella myös palautetaan liikealusta takaisin alkuperäiseen asentoon toteuttamaan seuraavia kiihtyvyyksiä. Perinteinen washout-suodatin sisältää kaksi ylipäästö suodatinta ja kaksi integraattoria. Tällä menetelmällä saadaan korkeataajuiset kiihtyvyydet asematiedoksi liikealustalle. Matalataajuiset kiihtyvyydet ohjataan alipäästösudattimelle, joka käsittelee kiihtyvyydet ja usein näiden toteutus tehdään kallistamalla alustaa tietyn akselin ympäri. On kehitetty myös adaptiivinen washout-suodatus. Tällä suodatuksella voidaan muuttaa parametrien arvoja simuloinnin aikana automaattisesti, jolloin liiketuntuma on parempi[5,6].

Suodatuksen tärkein ja vaikein osa on löytää oikeat parametrit suodattimille. Parametrit joudutaan hakemaan tapauskohtaisesti. Väärillä parametreilla signaali voi vääristyä ja liiketuntuma on väärä.

2.5.2. Käänteiskinematiikka

Perinteisesti halutaan ohjata toimilaitteita tiettyyn pisteeseen ja orientaatioon. Esimerkiksi robottikäden haluttu piste ja orientaatio saadaan tietoon toimilaitteiden ohjearvoista lasketuista arvoista. Liikealustassa halutaan ohjata kuitenkin tiettyä pistettä tiettyyn pisteeseen ja orientaatioon. Tässä käytetään käänteiskinematiikkaa. Käänteiskinematiikassa pisteen paikan ja orientaation avulla lasketaan toimilaitteille oikeat arvot [7].

Liikkuva kappale ja sen pisteet on helpoin tapa kuvata lokaalissa koordinaatistossa. Tällöin koordinaatisto liikkuu globaalissa koordinaatistossa eli sen asema muuttuu ja kappaleen kuvaus pysyy samana liikkeen aikana. Globaali koordinaatisto on paikallaan. Kuvassa 2.12 on esitetty yhdensuuntaisten koordinaatistojen muunnos.

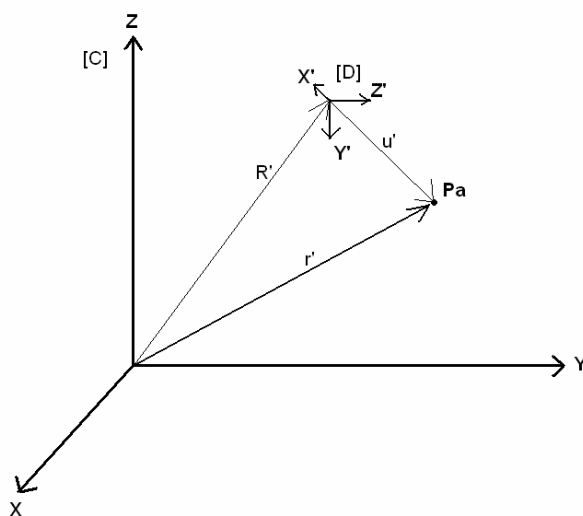


Kuva 2.12 Yhdensuuntaisten koordinaatistojen muunnos.

Kuvasta nähdään, että pisteen Pa koordinaatit voidaan kirjoittaa globaalissa koordinaatistossa [A]:

$${}^A r = {}^A R + {}^B u \quad (1)$$

Jossa ${}^A R$ on kappaleen koordinaatiston asema globaalissa koordinaatistossa eli siirtomatriisi, ${}^B u$ on pisteen Pa asema lokaalissa koordinaatistossa [B], ${}^A r$ on kappaleen pisteen Pa paikka globaalissa koordinaatistossa. Kappaleen kierto mukaan otettaessa pitää vektori ${}^B u$ kertoa kiertomatriisilla ${}^C_D A$. Kuvassa 2.13 nähdään kiertynyt koordinaatisto globaalissa koordinaatistossa.



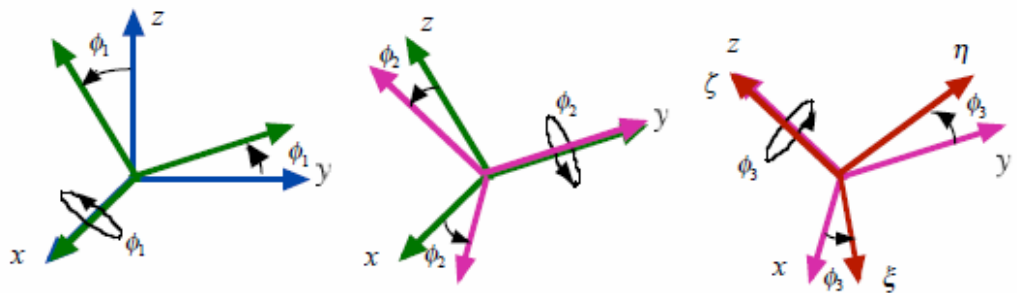
Kuva 2.13 Koordinaatiston kierto globaalissa koordinaatistossa.

Jolloin saadaan yleisen tapauksen pisteen Pa :n, joka on koordinaatistossa $[D]$, esittäminen globaalissa koordinaatistossa $[C]$:

$${}^C r' = {}^C A^D u' + {}^C R' \quad (2)$$

Jossa ${}^D u'$ on pisteen Pa kuvaus lokaalissa koordinaatistossa, ${}^C R'$ on koordinaatiston $[D]$ siirtomatriisi, ${}^C r'$ on pisteen Pa kuvaus globaalissa koordinaatistossa ja kiertomatriisi on ${}^C A$. Näin voidaan kuvata kappaleen kaikki pisteet globaalissa koordinaatistossa.

Kappaleen kiertomatriisia voidaan kuvata monella eri tavalla. Yleisempiä tapoja on Eulerin kulmat, Rodriguezin parametrit, Eulerin parametrit, Bryantin kulmat ja Quaternionit. Kuvassa 2.14 nähdään Bryantin kulmien kierto järjestyksessä X-Y-Z-akseleiden ympäri.



Kuva 2.14 Bryantin kulmien kierto akseleiden ympäri.[8]

Bryantin kulmat sopivat hyvin laskujen laskemiseen niiden ymmärrettävyyden takia. Quaternionit ovat myös vakaampia, eivätkä voi mennä Gimbal-lukkoon, joka tarkoittaa vapausasteiden tai kierron menettämistä muunnoksessa. Kuitenkin liikealustan kulmat ovat pienempiä kuin 180° , joten lukkoon menemisen vaaraa ei ole. Laskuissa käytetään Bryantin kulmia ja ohjelmoinnissa Quaternioniaoneja, niiden neljän parametri esityksen takia.

Bryantin kulmat määritetään kolmen kiertymän avulla:

- kiertymä X-akselin ympäri (roll): ϕ_1
- kiertymä Y-akselin ympäri (pitch): ϕ_2
- kiertymä Z-akselin ympäri(yaw): ϕ_3

Kulmat pitää sijoittaa kiertomatriisiin (3×3) ja kiertomatriisi on muotoa:

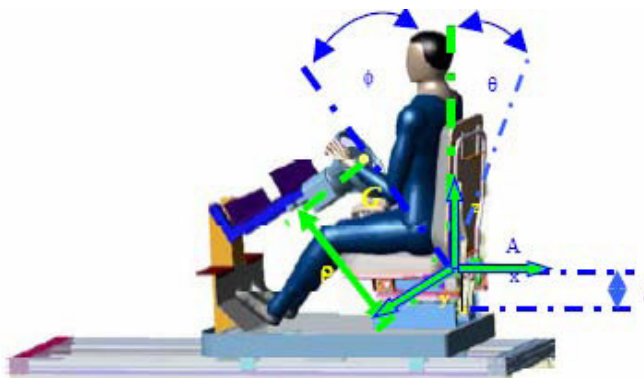
$$A = \begin{bmatrix} c\phi_2 c\phi_3 & -c\phi_2 s\phi_3 & s\phi_2 \\ c\phi_1 s\phi_3 + s\phi_1 s\phi_2 c\phi_3 & c\phi_1 c\phi_3 - s\phi_1 s\phi_2 s\phi_3 & -s\phi_1 c\phi_2 \\ s\phi_1 s\phi_3 - c\phi_1 s\phi_2 c\phi_3 & s\phi_1 c\phi_3 + c\phi_1 s\phi_2 s\phi_3 & c\phi_1 c\phi_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

jossa c on cosini ja s sini.

2.6. Liikealustan rakenne

Liikealustan perusrakenne on toteutettavissa monella eri tavalla. Kaupallisia sovelluksia on useita erilaisia ja itse rakennettujakin on monia. Rakenteen valinta vaikuttaa suuresti vapausasteiden määrään. Vapausasteilla tarkoitetaan liikealustan riippumattomien liikkeiden suunnan määrää. Vapaalla kappaleella on kuusi vapausastetta, kolme translaatioon ja kolme rotaatioon. Esimerkiksi hissisimulaattorissa tarvitaan vain yhden vapausasteen liikealusta, joka tuottaa liikkeen pystysuuntaan. Kuten hissisimulaattori esimerkissä, kyseinen sovellus, johon liikealusta tulee, määrittää monenko vapausasteen liikealusta tarvitaan.

Perinteisesti liikealusta koostuu kahdesta osasta, perustaosasta (base) ja liikkuvasta osasta ja näiden väliin tulevista toimilaitteet. Toimilaitteilla liikutetaan liikkuvaa osaa ja perusosa pysyy paikalla. Vapausasteiden määrää voidaan rajoittaa erilaisilla nivelöinneillä ja johteilla. Usein kuitenkin rakenne valitaan siten, että liikealusta toteuttaa tarvittavat liikkeet ilman rajoituksia. Jos tietty liike on erityisen suuri tai tärkeä, voidaan kyseiselle liikkeelle rakentaa oma toimilaite toteuttamaan liike. Esimerkiksi usein tietty translaatio liike toteutetaan kiskorakenteella, kuten kuvassa 2.15. Samasta kuvasta nähdään myös edestakaisen liikkeen olevan huomattavasti tärkeämpi kuin kallistuksen kyseisessä simulaattorissa.



Kuva 2.15 Kahden vapausasteen liikealusta[6].

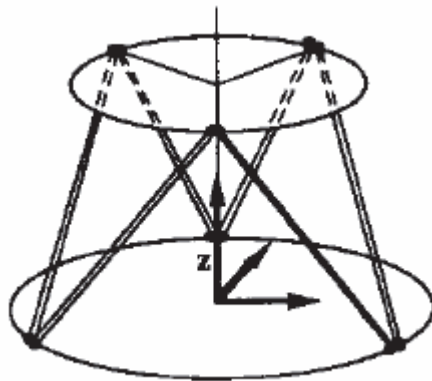


Kuva 2.16 Kaksi vapausasteinen liikealusta, joka on keskeltä tuettu [9].

Kuvassa 2.16 on liikealusta jonka liikkuva osa on tuettu keskeltä. Tukitolppa on kiinteästi kiinni perustaosassa ja ristinivelellä liikkuvassa osassa. Tällä rakenteella saadaan liikealusta kestävämmän suurempia kuormia, koska tolppa ja ristinivel kantavat suurimman osan kuormasta ja toimilaitteita rasitetaan vain liikkeen tuottamiseen. Näin voidaan rakentaa isoillekin kuormille liikealusta ilman, että toimilaitteiden kokoa tarvitsee kasvattaa.

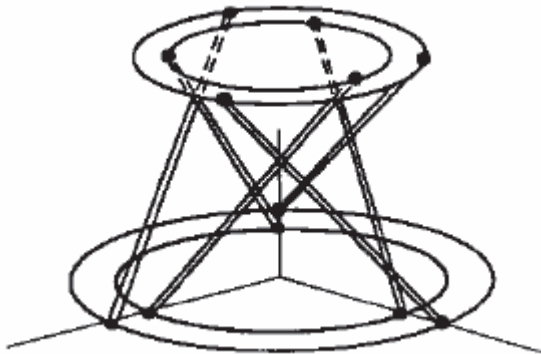
Stewart-liikealusta

Yleisesti tunnetuin liikealustan rakenne on Stewart-liikealusta. Stewart-liikealustan esitteli ensimmäisenä simulaattorikäyttöön Stewart itse vuonna 1965 [10]. Hän oli kehittänyt ideansa V.E. Gough:n automaattisesta renkaan testaus robotista[11]. Stewart-liikealusta koostuu perustaosasta ja liikkuvasta osasta. Niiden väliin tulee kuusi lineaarista toimilaitetta. Toimilaitteet sijoitetaan kuvan 2.17 mukaisesti. Kuvassa ylempi ympyrä kuvaa liikkuvaa osaa ja alempi ympyrä perustaosaa. Vinot kaksoisviivat ovat toimilaitteita. Stewart-liikealustoja kutsutaan usein hexapod-liikealustoiksi.



Kuva 2.17 Stewart-liikealustan periaatekuva[12].

Stewart-liikealustasta on kehitetty myös modifioitu versio. Kuvassa 2.18 on esitelty vaihtoehtoinen tapa sijoittaa toimilaitteet.



Kuva 2.18 Modifioidun Stewart-liikealustan periaatekuva [12].

Modifioidussa liikealustassa kolme toimilaitetta on sijoitettu ulkokehälle ja kolme toimilaitetta sisemmälle kehälle. Ja toimilaitteet ovat toisiinsa nähden ristissä. Tällä konstruktiolla saavutetaan suuremmat voimat X- ja Y-akseleiden suuntiin. Samalla saadaan suurempi vääntö Z-akselin ympäri. [6]

Stewart-liikealustoja on käytetty hyvin yleisesti ja niitä on kehitetty myös paljon. Tähän syynä ovat niiden yksinkertainen rakenne ja siihen helposti valittavat lineaariset toimilaitteet. Lisäksi merkittävä etu Stewart-liikealustassa on, että se kykenee tuottamaan kuuteen eri suuntaan liikettä, kolme translaatioon ja kolmen akselien kierron.

Stewart-liikealustan ohjaus on hyvin yksinkertaista. Haluttua kallistusta varten pitää ratkaista ainoastaan toimilaitteiden pituudet ja tämä onnistuu käänteiskinematiikan avulla.

2.7. Liikealustan toimilaitteet

Liikealustoissa käytetään hyvin erilaisia toimilaitteita riippuen rakenteesta ja käyttökohteesta. Paras tapa toimilaitteet on jakaa ne niiden käyttöenergian mukaan. Yleisimmin käytetyt ovat sähkö- ja hydraulikkatoimilaitteet. Pneumaattisia sovelluksia on vähemmän. Vaikka toimilaitteilla on erilainen käyttöenergia, ne voivat toteuttaa liikkeitä samalla tavalla. Yleisimmät käytetyt toimilaitteet tuottavat joko lineaarista tai pyörivää liikettä. Esimerkiksi sylinteri voi tuottaa lineaarisen liikkeen suoraan tai keinuvaa liikettä vipumekanismin avulla. Vastaavasti pyörivä moottori tuottaa suoraan pyörivää liikettä, mutta voidaan tuottaa vipumekanismeilla tai lineaarivaihteilla lineaarista liikettä.

Toimilaitteissa on hyvin paljon eroja, paitsi käyttöenergia, niin asemointi tarkkuus, nopeus, liike ja tilan tarve. Asemointi riippuu paljon toimilaitteesta. Toiset toimilaitteet tarvitsevat erillisiä antureita tai rajoja, joiden kanssa se toimii. Tilan tarpeeseen vaikuttaa itse toimilaite sekä mahdollinen koneikon tarve.

2.7.1. Hydrauliiikka

Hydrauliiikkaa käytetään liikealustoissa usein. Sillä saavutetaan suuria voimia ja kiihtyvyyksiä sekä nopeuksia. Hydraulisen toimilaitteen liike on jouhevaa ja hiljaista. Hydrauliiikka on myös helppo ohjata. Hydraulisia toimilaitteita on saatavilla paljon ja eri valmistajilta. Hydraulisia toimilaitteita on lineaarisia sekä pyöriviä eli erilaisia moottoreita. Hydrauliiikalla on myös kohtalainen teho/paino-suhde. Haittana hydrauliiikalla on kuitenkin sen vaatima koneikko. Se on usein kallis, suuri ja äänekäs. Lisäksi usein hydrauliiikan haittana on sen likaisuus.[7]

Pyörivä liike voidaan toteuttaa hydrauliiikalla yleisesti joko hydraulimoottorilla tai hydraulivääntömoottorilla. Vääntömoottorin etuna on sen tuottama suuri momentti, ja sillä voidaan toteuttaa liikealustan koko pyörivä liike. Liikealue on usein rajattu alle 360 asteeseen, mutta usein se on riittävä.

Lineaarisen liikkeen hydrauliiikalla voidaan toteuttaa helposti hydraulisylinterillä. Hydraulisylinterillä on pitkä iskunpituus suhteessa lepopituuteen. Hydraulisella liikealustalla onkin usein iso liikealue. Hydraulisylinteriin on mahdollista integroida lineaarianturi, jolloin saadaan asematieto takaisinkytkentää varten.

2.7.2. Sähkötoimilaitteet

Sähkötoimilaitteet eivät tarvitse erillistä koneikkoa kuten hydrauliiikka. Yleisesti sähkölaitteet ovat varsin kestäviä ja luotettavia, mutta väärinkäytöllä ne on helppo rikkoa tai polttaa. Sähkötoimilaitteet voivat myös toteuttaa lineaariliikkeen ja pyörimisliikkeen. Lineaariliike voidaan toteuttaa lineaarimoottorilla ja pyöriväliike voidaan saada aikaa perinteisellä sähkömoottorilla. Sähkömoottoreita on monenlaisia.

Servomoottori

Servomoottori on varsin yleinen liikealusta käytössä. Sen etuna on kohtuullinen momentti ja hyvät asemointi- ja säätöominaisuudet. Haittana on niiden kallis hinta ja erikoisosaamisen tarve.

Askelmoottori

Askelmoottorilla saavutetaan tarkka asemointi ilman säätöä, mutta ilman takaisin kytkentää syntyy pysyvää asentovirhettä pitkän ajan kuluessa. Askelmoottorin ongelmana on sen alhainen vääntömomentti.

Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottorilla ei saavuteta yhtä hyviä dynaamisia ominaisuuksia kuin servomoottoreilla. Hitailla nopeuksilla se vaatii erillisen jäähdytyksen. Hinnaltaan se on edullisempi.

Lineaarimoottori

Lineaarimoottori on ainoa sähkömoottori, jolla voidaan tuottaa lineaariliike nimensä mukaisesti ilman mekanismeja. Lineaarimoottorissa staattori ja roottori on levitetty tasoon. Pyörivän sähkökentän sijasta on vaeltava sähkökenttä. Lineaarimoottoreilla saadaan usein nopeita liikkeitä, mutta pienillä kuormilla. Lisäksi sen hyötysuhde on heikko.

Jotta perinteisellä sähkömoottorilla voitaisiin toteuttaa lineaarista liikettä, sähkömoottoriin tarvitsee kytkeä jokin mekanismi. Lisäksi sähkömoottorin tarvitsee pyöriä lujaa, jotta sen hyötysuhde olisi hyvä. Tästä syystä sähkömoottorikäyttöiseen toimilaitteeseen joudutaan lisäämään jonkinlainen alennusvaihte. Yleisimmät tällaiset mekanismit sähkötoimilaitteille on vipumekanismi ja karamoottori. Karamoottori koostuu sähkömoottorista ja lineaarivaihteesta. Yleisimmin käytetyt lineaarivaihteet ovat trapetsi-, kuula- tai rullaruuvi, jotka toimivat samalla alennusvaihteena. Lineaarivaihteen avulla pyörivä liike muutetaan lineaariliikkeeksi. [7]

Vipumekanismiin tarkoituksena on myös tuottaa lineaarista liikettä. Sähkömoottoriin on kytketty alennusvaihte, jotta momentti kasvaisi ja pyörimisnopeus hidastuisi. Alennusvaihteeseen on kiinnitetty kampi, joka nostaa liikkuvaa osaa. Kuvassa 2.16 nähdään kyseinen rakenne. Mekanismista saatava nopeus ja voima muuttuvat kammen kulman funktiona. Vaihteen pitää olla hyvä ominaisuuksiltaan, jotta sillä saadaan tarkka asemointi. [7]

2.7.3. Pneumatiikka

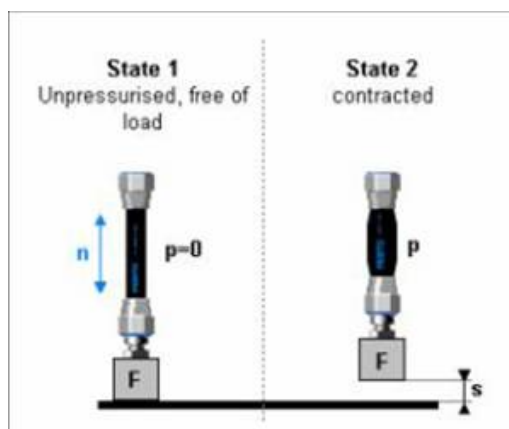
Pneumatiikalla toteutettuja liikealustoja on hyvin vähän. Tähän syynä ovat pneumatiikan heikot ominaisuudet voimantuottamisessa ja haastavasta ohjauksesta. Ilma väliaineena kokoon puristuu voimakkaasti suurilla kuormilla ja suurien voimien tuottamiseen tarvitaan usein isoja toimilaitteita. Pneumatiikka sylinterin momentti ja voima ovat noin alle 5 % hydraulikan arvoista[7]. Pneumatiikan liikenopeudet ovat usein riittäviä mekanisoituihin teollisuus koneiden perustarpeisiin. Pneumatiikan hyvinä puolina on yksinkertaisuus, luotettavuus ja halpuus. Paineilmaverkko on monissa paikoissa saatavilla, joten yleensä ei vaadita erillistä koneikkoa. Tunnetuin toimilaite pneumatiikassa on paineilmasylinteri. Tällä voidaan tuottaa lineaarista liikettä.

Ilmalihäs



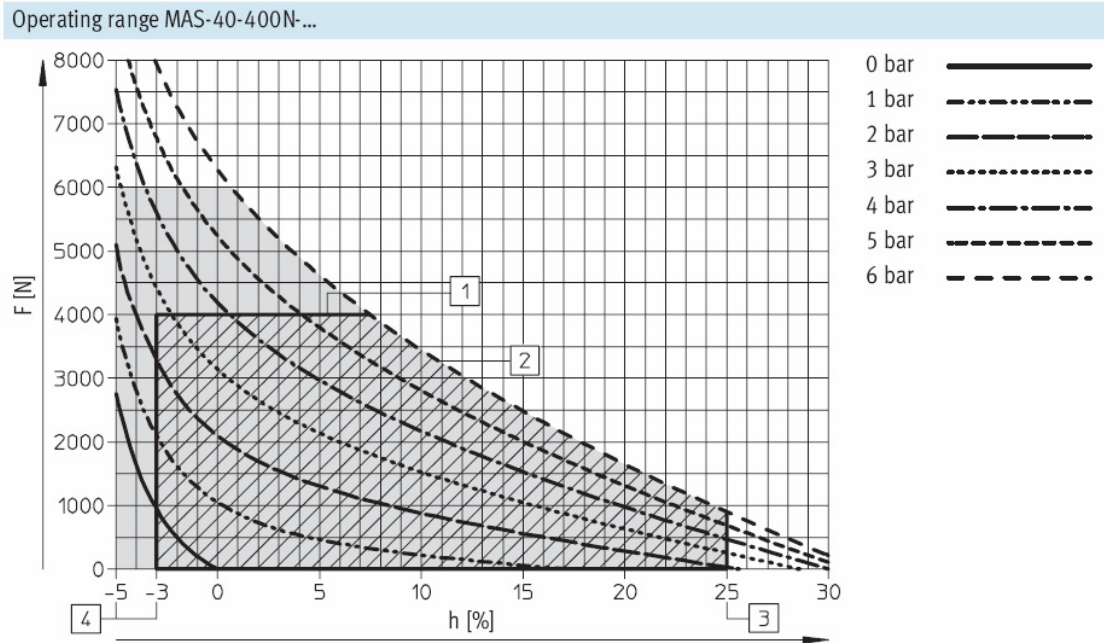
Kuva 2.19 Feston ilmalihäs [13].

Festo on tuonut markkinoille uuden pneumaattinen toimilaitteen, kuvassa 2.19 olevan, ilmalihaksen. Ilmalihaksen toimintaperiaate keksittiin jo 1950-luvulla. Sitä kutsutaan McKibben-toimilaitteeksi. Ilmalihäs on toimilaite, jonka päissä on päätykappaleet. Toimilaite kiinnitetään päätykappaleista ja siitä paineilma ohjataan sen sisään. Päätykappaleiden väliin jää työn tekevä osuus. Se on periaatteessa kumiputki, jossa on integroituna kuituja vinosti toimilaitteeseen nähden. [14] Ilmalihaksen toiminta perustuu kumiputken laajenemiseen paineen voimasta. Putken laajetessa sen ulkohalkaisija kasvaa ja pituus lyhenee. Voiman suuruus riippuu kuitujen asennuskulmasta. Toimilaite voi tuottaa jopa 6000 N voiman. Ilmalihaksen paino on vain noin kilon, riippuen pituudesta. Ilmalihakella onkin suurin tunnetuin voima/paino-suhde muihin toimilaitteisiin verrattuna [15].



Kuva 2.20 Ilmalihaksen toiminto [13].

Ilmalihäs on yksitoiminen toimilaite, se pystyy tuottamaan ainoastaan vetoa. Kuvassa 2.20 nähdään ilmalihaksen toiminta. Vasemmalla puolella kuvassa paine on nollassa ja lihas on asettunut ominaispituutensa. Oikealla puolella lihas on paineistettu ja näin tuottaa voiman ja nostaa punnuksen. Yksitoimisuudessa on huono puoli, että palautus joudutaan toteuttamaan painovoiman avulla tai vastapainon avulla. Vastapainona voi toimia myös jousi tai toinen ilmalihäs.



Kuva 2.21 Paineilmalihaksen pituus-paine-voimantuotto kuvaaja [13].

Lihaksen voiman tuotto riippuu lihaksen paineesta. Kuvassa 2.21 on esitetty pituuden, paineen ja voimantuoton suhteet. Vaaka-akselilla on lyhenemä prosentteina ominaispituuteen nähden. Pystyakselilla on voima Newtonina. Erilaisilla viivoilla piirretyt käyrät kuvaavat painetasoa, joka voi olla nolasta kuuteen baariin, kuvassa [2] maksimi paine toimilaitteelle. Harmaa alue kuvaa toimilaitteen toimialuetta ja viivoitettu alue, kuvassa alue [1], kuvaa varoventtiilillä varustettua ilmalihaksen toimialuetta. Kuvasta nähdään ilmalihaksen rajallinen lyheneminen, joka on maksimissaan 25 prosenttia, kuvassa kohta [3]. Ilmalihasta voidaan myös kuormittaa paineistamattomana jolloin tämä venyy vähän, kuvassa kohta [4]. Kuvasta nähdään, että paineistamattomana lihas venyy 5 prosenttia noin 2600 N kuormalla. Näin toimialuetta voidaan hieman kasvattaa. Toimilaitetta voidaankin kuvata jäykkyydeltään muuttuvaksi jouseksi [15]. Jousen lepopituutta ja jousivakiota muutetaan paineen avulla. Haastavana tekijänä, kuten kuvasta 2.21 nähdään, on toimilaitteen epälineaarisuus. Tämä tuottaa ilmalihaksen asemoinnissa hankaluuksia. Samalla hankaluuksia asemointiin tuottaa hystereesi, ilmalihaksen voimantuotossa.

Staattisia fysikaalisia arvoja voidaan laskea lihaksesta olettamalla lihaksen kumiosuus lieriöksi ja laajentuminen tapahtuu joka kohdassa yhtä paljon. Lihakseen tehty työ dW_{in} voidaan laskea ilman painaessa kumin sisäseinämää.

$$dW_{in} = \int_{S_i} (P - P_0) \cdot dl_i \cdot ds_i = (P - P_0) \int_{S_i} dl_i \cdot ds_i = P' dV \quad (4)$$

Jossa P on absoluuttinen paine, P_0 ympäristön paine ($1 \text{ atm} = 1,0336 \text{ bar}$), P' on ylipaine, dl_i on sisäseinämän etäisyyden muutos, ds_i on alue vektori, S_i on koko kumin sisäpinta, dV on tilavuuden muutos. Lihaksen tekemä työ dW_{out} voidaan laskea kaavalla:

$$dW_{out} = -FdL \quad (5)$$

jossa F on lihaksen suuntainen voima ja dL on lihaksen suuntainen pituuden muutos. Virtuaalisen työn lausekkeella voidaan merkitä yhtälöt yhtä suuriksi.

$$dW_{in} = dW_{out} \quad (6)$$

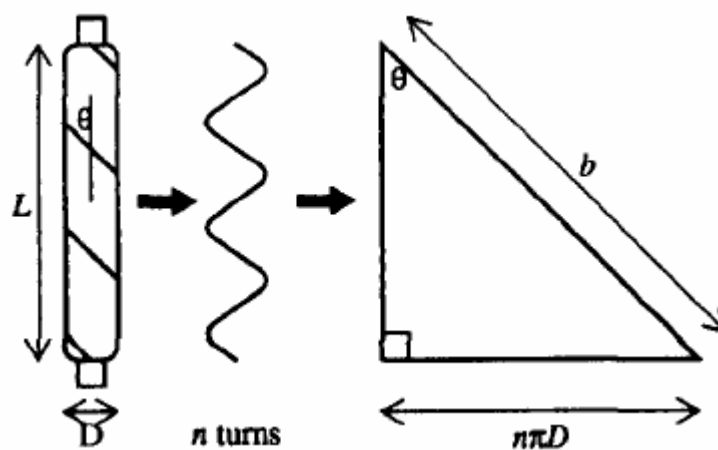
Yhtälöistä (7) ja (8) saadaan:

$$-FdL = P'dV \quad (7)$$

Ja lihaksen tuottama voima saadaan laskettua.

$$F = -P' \frac{dV}{dL} \quad (8)$$

Yhtälöstä (11) huomataan, että lihaksen tuottamaan voimaan vaikuttaa paine lihaksen sisällä, tilavuuden muutos ja pituuden muutos.



Kuva 2.22 Ilmalihaksen kuidun ja sen asennuskulman esitys [17].

Kuitu voidaan ajatella kulkevan saman matkan kuin kierretyn suorakulmaisenkolmion hypotenuusa kuten kuvassa 2.22. ϕ on kuidun kulma lihaksen keskiakseliin nähden. L

on lihaksen pituus. D on lihaksen halkaisija ja b on kuidun pituus. Kuvasta saadaan kirjoitettua yhtälöt lihaksen pituudesta ja halkaisijasta kuidun kulman funktiona.

$$L = b \cdot \cos \phi \quad (9)$$

$$D = \frac{b \cdot \sin \phi}{n \cdot \pi} \quad (10)$$

Nähdään, että kuidun asennuskulma vaikuttaa sekä lihaksen pituuteen ja halkaisijaan ja näin ollen myös tilavuuteen. Asennus kulma vaikuttaa myös tuotettavan voiman määrään. Festo, ilmalihaksen valmistaja, ei ole ilmoittanut kuidun asennuskulmaa, kierrosten määrää tai kuidun pituutta. Siksi tarkkaa mallinnusta lihaksesta ei saada suoraan matemaattisilla kaavoilla. Lihasten mallintaminen kannattaakin tehdä kolmannen asteen polynomifunktion avulla, jolloin saadaan melko tarkka käyttäytyminen lihaksesta [16]. Feston kotisivuilta voidaan ladata apuohjelma, joka laskee tarvittavia suureita, esimerkiksi paineen, voiman, pituuden muutoksen tai ilman määrän tarve. Tässä työssä lasketaan Feston apuohjelman avulla tarvittavia arvoja.

3. LIIKEALUSTAN SUUNNITTELU

Lähtökohtana suunnitteluun on löytää mahdollisimman yksinkertainen ja edullinen ratkaisu. Konstruktiviisiin ratkaisuihin tärkeimpinä vaikuttajina ovat valmistus- ja materiaalitekniset kysymykset. Materiaalien pitää olla yleisiä ja helposti saatavissa. Liikealustassa käytettyjen osien tulee olla standardi- ja massavalmistuksen tuotteita. Näin varmistetaan osien saatavuus tulevaisuudessa ja edullisuus. Valmistuksen pitää olla helppoa ja nopeaa. Suunnittelussa tulee myös ottaa huomioon valmistuspaikka. Liikealusta tullaan rakentamaan itsenäisesti Konstruktiotekniikanlaitoksen raskaan laboratorion metallityöpaikassa. Valmistukseen on käytettävissä seuraavat metallityöstökoneet: metallisorvi, vannesaha, pylväsporakone, kulmahiomakone ja hitsausvälineet.

Ensimmäisenä tehtävänä on selvittää vaadittavat/toivottavat ominaisuudet. Tämä vaihe tehdään vaatimuslistan avulla. Liikealustan rakenteiden ja mitoituksen valinta kulkee rinnakkain, koska tietyt rakenne valinnat vaikuttavat myös mitoitukseen ja toimilaitteisiin.

3.1. Vaatimuslista

Liikealustan suunnittelun aluksi määritellään vaatimus- ja toivelista. Listan tarkoituksena on selvittää, mitkä asiat ovat tärkeitä ja toteutetaan, ja mitkä ominaisuudet ovat toivelistalla ja toteutetaan, jos mahdollista. Tarkkoja arvoja määrittämislistalle ei ole annettu, koska tehtävänä oli suunnitella aivan uusi laite laboratorioon

VAATIMUKSET:

- mahtuu konstruktiotekniikan virtuaalitilaan
- kevyt – voidaan käyttää Seinäjoen CAVE-tilassa
- helppo kuljettaa
- kasauksen ja purkauksen kyettävä tekemään yksi henkilö
- kykenee kantamaan isoja kuormia, 300 - 400 kg
- edullinen
- liikkuvan osan pitää olla tarpeeksi suuri, jotta ohjaamon penkki ja hallintalaitteet
- kuljetuksen aikana pitää mahtua farmari- tai pakettiautoon.

TOIVOMUKSET:

- hiljainen

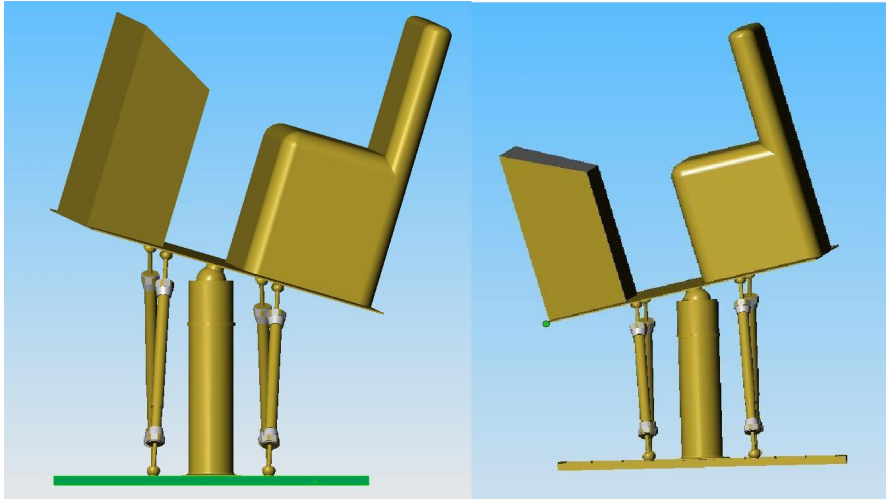
- kykenee $\pm 10^\circ$ kallistuksiin
- ei tule näyttöpintojen eteen
- kykenee tuottamaan liikettä kaikkiin kuuteen vapausasteen suuntaan
- vasteajan pitää olla riittävän pieni, jotta ei jää jälkeen kuvasta, noin 250 ms.

3.2. Käyttöenergian ja toimilaitteen valinta

Käyttöenergian ja toimilaitteen valinta on tärkeää, koska se vaikuttaa paljon millaisia lisälaitteita joudutaan hankkimaan, esimerkiksi koneikkoa. Tässä työssä valittiin paineilmalla toimivat ilmalihakset. Valintaan vaikutti, että konstruktiotekniikan virtuaalilaboratoriossa oli paineilmaverkko saatavilla suoraan. Näin säästetään rahaa, sekä koneikon hankinnassa että toimilaitteissa. Ja ilmalihakset kykenevät tuottamaan hyvinkin suuria voimia. Paineilmasyylinteriä ei valittu huonon voiman tuoton takia. Ilmalihasta voidaan ohjata sekä avoimella- ja suljetullaohjauksella. Heikkona puolena on ainoastaan toimilaitteen yksitoimisuus. Erillistä vertailua ei tarvittu hydraulikan kanssa, koska koneikon hankinta olisi ollut taloudellisesti liian suuri hankinta. Hydraulikka vuotaa aina jonkin verran ja näin olisi tullut likainen ja tahriva laite virtuaalilaboratorioon. Pneumatiikassakin on vuotoja, mutta vuodot ovat ilmaa joten se ei ole haitaksi. Sähkötoimilaitteet taas hylättiin myös hinnan takia, koska useimmissa sähkötoimisissa liikealustoissa on hintavat servokäyttöiset moottorit ja jonkinlainen lineaarivaihte. Työssä haluttiin tehdä myös jotakin uudella tavalla. Feston ilmalihakset tarjosivat tähän hyvän tilaisuuden.

3.3. Rakenteen valinta

Koska toimilaitteena on yksitoiminen ilmalihakset, tekee se rakenteen valinnasta ja suunnittelusta haastavaa ja erittäin tärkeän. Rakenteella tässä tarkoitetaan lähinnä lihaksien sijoitustapaa. Ratkaisevana tekijänä on lihasten sijoitus liikkuvan osan ala- tai yläpuolelle. Lihasten sijoittaminen alapuolelle liikkuvaa osaa, kuten kuvassa 3.1, joudutaan käyttämään jonkinlaista tukipistettä eli niveltä kantamaan kuorma. Tämä siis siksi, etteivät lihakset kykene kantamaan puristavaa kuormaa, vaan ainoastaan vetoa.



Kuva 3.1 Lihakset sijoitettuna liikkuvan osan alle.

Lihaksien sijoitus liikkuvan osan alapuolelle vähentäisi lihaksien kuormitusta ja näin lihaksien toiminta olisi nopeampaa. Huonoja puolia olisi luopuminen kolmesta vapausasteesta eli kaikista translaatio liikkeistä. Samalla rakenteesta tulisi korkeahko, koska lihasten supistuminen on ainoastaan 25 prosenttia nimellispituudestaan ja vaadittavien kulmien saavuttaminen vaatii ison liikematkan toimilaitteelta. Korkea rakenne tulisi ongelmalliseksi näyttöpintojen kanssa. Liikealusta olisi kuvan edessä tai näyttöpintoja jouduttaisiin korottamaan. Näyttöpintojen korottaminen hankaloittaa virtuaalitalan muuta käyttöä, jolloin ihmiset ovat lattiatasossa.

Toinen vaihtoehto olisi sijoittaa ilmalihakset liikkuvan osan yläpuolelle. Tällöin liikkuva osa roikkuisi lihasten varassa. Näin konstruktiosta tulisi matalampi. Haasteena tässä tilanteessa olisi saada perusosan kiinnityskohdat sellaiseen kohtaan etteivät ne olisi käyttäjän edessä tai häiritse käyttäjää muuten käytön aikana. Kun liikealustaa ei käytettäisi, lihakset olisivat tyhjinä ja liikkuva osa kuormittaisi lihaksia omalla painollaan. Tämä ei olisi ongelma, koska lihaksia voidaan kuormittaa tyhjänä, eli venyttää, lihaksesta riippuen 3-5 prosenttia nimellispituudestaan. Lihaksien ollessa yläpuolella voidaan myös käyttää tukiniveltä, mutta tällöin rajoitettaisiin liikkuvan osan vapausasteita, joten se ei ole kannattavaa. Tukinivelenä voisi toimia ristikkonivel. Haastavaksi lihasten sijoittamisessa yläpuolelle tulisi liikkeen tuottaminen alaspäin, kun lihakset ainoastaan vetävät liikkuvaa osaa ylöspäin. Tällöin alaspäin oleva kiihtyvyys olisi maksimissaan painovoima eli yksi g. Kiihtyvyyden lisäämiseksi voidaan liikkuvan osan alle lisätä jousi tai jousia. Tämän ongelmana on lihaksiin kohdistuva alkukuormitus. Liikkuvan osan liikkuminen ylöspäin hidastuisi, koska siihen tarvittava voima olisi isompi kuin ilman joustia. Tämä hidastuttaisi liikkeitä ja jousista voisi aiheutua turhaa edestakaista liikettä pysähtyessään. Lihasten ollessa liikkuvan osan yläpuolelle sijoitettuna joudutaan liikealustan varsinaista käyttöä ennen lihaksia supistamaan noin puoleen väliin, jotta liikealusta voisi toteuttaa liikkeitä kaikkiin suuntiin alkutilanteesta. Yhtenä toteutus vaihtoehtona olisi sijoittaa lihakset aivan katon rajaan ylös ja rakentaa kokonainen hytti tai vastaava tila, joka liikkuisi. Tämän

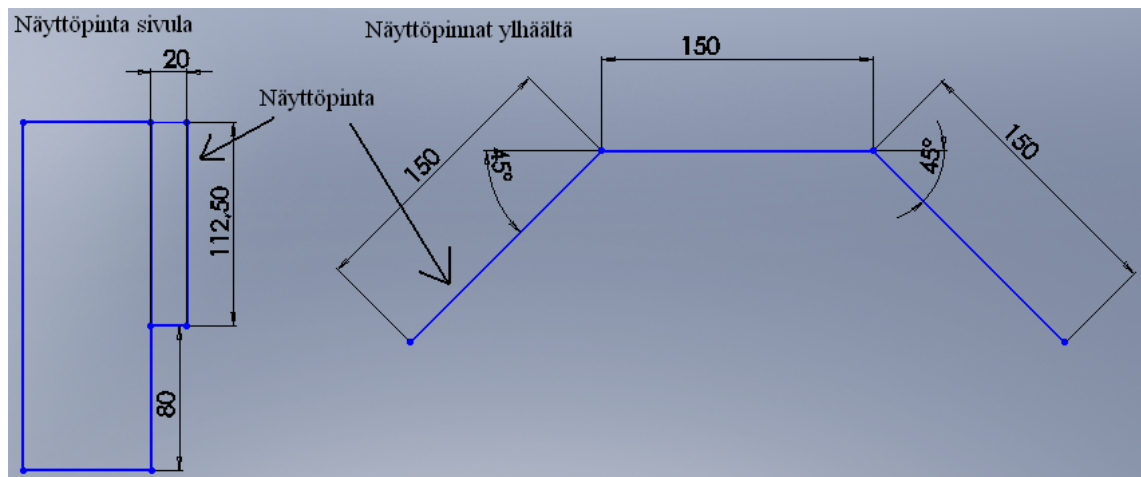
ongelmana on taas massiivinen rakennelma, ja hytti olisi vain tiettyä sovellusta varten. Tämän liikuttaminen toiseen paikkaan olisi hankalaa ja kyseinen konstruktio ei soveltuisi Seinäjoen viisiseinäiseen CAVE-ympäristöön.

Edellä mainittujen asioiden takia työhön valittiin lihasten sijoitus liikkuvan tason yläpuolelle. Lihasten sijoittamisesta liikkuvan osan ja perusosan välille päätettiin valita perinteisen Stewart-liikealustaan perustuva sijoitus tapa. Tällä sijoitustavalla saadaan aikaan kaikki vapausasteet, kuten toivelistalla oli. Tämä on varsin yleisesti käytetty sijoitustapa ja se on varsin hyvä. Yleisesti toimilaitteet ovat sijoitettu Stewart-alustassa liikkuvan osan alapuolelle, mutta nyt ne ovat yläpuolella. Tästä syystä rakenne muuttuu hieman perinteiseen Stewart-alustaan nähden. Rakenne on ikään kuin käännetty ja liikkuva osa roikkuu toimilaitteiden varassa. Modifioidun Stewart-liikealustan käyttäminen ei soveltunut tähän tarkoitukseen, koska muuten toimilaitteet olisivat olleet käyttäjän tiellä ja vieneet näin tilaa liikealustaan liitettävältä tuoilta ja muilta laitteilta.

3.4. Liikealustan mitoitus

Liikealustan mitoittaminen on haastavaa ja tärkeää, koska tilaa on rajallinen määrä. Tässä tilanteessa tilalla on iso merkitys liikealusta liikematkojen ja kulmien tuottamiseen, siksi siitä pitää ottaa kaikki mahdollinen hyöty irti. Ensimmäinen vaihe mitoituksen suunnittelussa on tilan mittojen määrittäminen. Näin saadaan selville kuinka suuri liikealustasta voidaan tehdä. Sen jälkeen määritellään kuorma. Eli kuinka paljon massaa liikealustan päälle on tulossa. Tämä vaikuttaa toimilaitteisiin kohdistuvaan voimaan ja rakenteiden ratkaisuihin. Kolmanneksi suunnitellaan toimilaitteen kiinnitys, koska se vaikuttaa toimilaitteen kokonaispituuteen. Toimilaitteen pituuden muutos vaikuttaa yhtenä tekijänä liikealustan suorituskykyyn. Seuraavana vaiheena valitaan perusosan ja liikkuvan osan rakenne ja muoto. Tässä vaiheessa ei vielä mitoiteta pituuksia, mutta huomioidaan muodot ja laitteen sopivuus näyttöpintojen väliin. Viidenneksi optimoidaan kiinnityspisteet runkoon sekä liikkuvaan osaan. Tämä kohta suunnittelussa on erittäin tärkeää, koska kiinnityspisteiden paikka vaikuttaa myös liikealustan suorituskykyyn. Kiinnityspisteiden valinnan jälkeen tarkastetaan rakenne FEM-analyysillä, jotta voidaan todeta sen kestävyys. FEM-analyysi tehdään CosmosWorks-ohjelmalla. Suunnittelun ohessa valitaan rakennusmateriaali ja -profiilien käyttö. Liikealustaa mitoitettaessa turvallisuus näkökohdat ovat erittäin tärkeitä, koska laitteen kyydissä on ihminen.

3.4.1. Tilan mittojen määrittäminen



Kuva 3.2 Näyttöpinnat sivu- ja yläperspektiivistä, mitat senttimetreinä.

Kuvassa 3.2 nähdään näyttöpintojen sivuprofiilin ja ylhäältä päin kuvatun sijoitustavan. Kuvassa on myös mitat jotka määrittävät tilan, johon liikealustan tulee mahtua. Yhden näyttöpinnan leveys on 1500 mm ja ne ovat sijoitettuna kuvan mukaisella tavalla 45 asteen kulmaan toisiinsa nähden. Näyttöpinnat ovat 800 mm korkealla lattian pinnasta. Sivuprofiilista nähdään, että näyttöpinnan ja tukitolpan väliin jää 200 mm, joten tätä tilaa voidaan käyttää hyödyksi liikealustan suunnittelussa.

Työssä esimerkki simulaattorilaitteena on Sandvikin kaivoslastaus ajoneuvo Toro. Toron ohjaamo on sivuttain lastaajan kulkusuuntaan nähden eli istuttaessa katsomalla vasemmalle nähdään työkoneen etuosa ja kauha. Katsomalla suoraan eteenpäin nähdään ulos koneen oikealle ja katsottaessa oikealle nähdään koneen peräosa. Kaivoskauhalastaaja on suunniteltu näin, koska se joutuu ajamaan ahtaissa luolissa eteen- ja taaksepäin kääntymättä. Näin kuljettajankaan ei tarvitse kääntyä. Jotta virtuaaliympäristö vastaisi mahdollisimman paljon oikeaa ympäristöä, pitää varmistaa, että näyttöpinnoista nähdään kaikkiin suuntiin. Kuten kuvasta 3.24 nähdään, sivummaisat näyttöpinnat ovat 45 asteen kulmassa ja jos kuvitellaan kuljettajan katsovan sekä oikealle että vasemmalle, pitää penkki saada sijoitettua mahdollisimman lähelle keskimmäistä näyttöpintaa. Keskimmäistä näyttöpintaa tässä simulaattorikäytössä tarvitaan vähän, siinä sijaitsee ainoastaan ohjauspaneeli ja mittaristo.

3.4.2. Liikealustan kuorma ja massakeskipiste

Liikealustan tulee kestää ihmisen paino sekä Toro-kaivoslastausajoneuvon ohjaamon penkin paino. Penkkiin on integroitu kaksi ohjainta, jolla Toroa ajetaan ja hallitaan. Lisäksi liikealustaan liitetään kaksi poljinta, kuten oikeassakin Torossa on. Penkin paino on 60 kg. Ihmisen massaksi voidaan arvioida 100 kg. Eli yhteensä kuormaksi tulee 160

kg. Liikkuvan osan rungon massaa ei ole vielä tiedossa, mutta voidaan käyttää arviona kokonaismassasta laskuissa 300 kg, näin varmistetaan varmuus suunnittelussa. Penkki on oikeassa Torossa noin 90 cm korkeudella.

Toimilaitteiden pituus riippuu kulloinkin vallitsevasta kuormasta, jos halutaan toteuttaa suuria kallistuksia ja translaatioliikkeitä kaikkiin suuntiin, pitää liikkuvan osan massakeskipiste olla mahdollisimman keskellä. Näin lihasten liikealueet ovat hyvin samanlaiset toisiinsa nähden. Tämä valinta kuormittaa toimilaitteita tasaisemmin ja kallistukset ja translaatioliikkeet kaikkiin suuntiin ovat yhtä suuret. Kuljettajan ja penkin yhdistetty massakeskipiste pitää laskea. Kuljettaja ja penkki asetetaan samaan koordinaatistoon siten, että akseli X on näyttöpintaan päin, Y osoittaa ylöspäin ja Z vasemmalle. Koordinaatisto origo on penkin pohjassa keskellä. Penkin massapisteen koordinaatit ovat (-100 mm, 800 mm, 0 mm), kun asetetaan kuljettaja ja henkilö samaan koordinaatistoon siten, että henkilö istuu penkissä. Henkilön massapisteen koordinaatit ovat (-150mm, 1200mm, 0mm). Henkilön massapiste sijaitsee noin lantion kohdalla keskellä ihmistä. Näistä yhdistetty massakeskipiste on (-112,5 mm, 1050 mm, 0mm). Eli havaitaan, että penkki pitää asentaa 112,5 mm eteenpäin keskikohdasta, jotta saadaan massakeskipiste keskikohdalle liikkuvaa alustaa. Massakeskipisteen korkeus on 1050 mm:ssä. Tämä pitää ottaa suunnittelussa huomioon, kun mitoitetaan liikkuvan osan kiinnityspisteitä ja kallistuksen suuruutta. Kiinnityspisteet ovat samalla tukipisteitä ja jos massakeskipiste ylittää tukipisteiden välisen suoran, niin liikkuva osa keikahtaa. Tämä siksi, koska toimilaitteet ovat yksitoimisia ja kykenevät tuottamaan vain vetoa. Massakeskipisteen ylittäminen tukipisteet, aiheuttaa vastakkaisella puolella oleville lihaksille puristusta ja toimilaitteet eivät sitä kykene ottamaan vastaan. Tämänlainen tilanne on erittäin vaarallinen ja siksi se pitää ottaa huomioon erittäin tarkkaan liikealustan suunnittelussa.

3.4.3. Lihasten minimipituus ja kiinnitys

Lihasten kiinnitystapa on tarpeellista suunnitella tässä vaiheessa, jotta tiedettäisiin lihakseen tulevat lisäosat. Tämä vaikuttaa lihaksen pituuteen ja näin se vaikuttaa liikealueen mitoittamiseen. Lihaksen kiinnityksessä kannattaa lähteä liikkeelle lihaksesta itsestään ja millainen kiinnitysvalmius siinä on. Tässä työssä käytetään Feston MAS-40 lihasta. Lihaksen kumiosan nimellispituus on 500 mm. Päätykappaleet ovat 55 mm pitkiä. Lihaksen toisessa päässä on kiinnitystä varten M20 x 1,5 kierre ja toisessa päässä on M16 x 1,5 kierre. M20 x 1,5 päähän tulee kiinni paineilmansyöttökappale. Tämä tuo kokonaispituutta lisää 75mm. Paineilma syötetään kappaleen sivusta ja jatkokiinnitys kierrepäässä on M16 x 1,5. Lihaksen kokonaispituus syöttökappale mukaan luettuna on 694 mm.

Lihaksen kiinnitystapa runkoon ja liikkuvaan osaan kannattaa valita sellaisella nivelellä, joka mahdollistaa toimilaitteen liikkumisen vapaasti ylä- ja alasuunnassa, sekä

sivuttaissuunnassa riittävästi. Isoin liike tulee ylös - alas liikkeeseen. Vaihtoehtoina on käyttää joko ristikkoniveltä tai nivelpäätä. Ristikkonivel mahdollistaa isommat liikeradat kaikkiin suuntiin, mutta sen kiinnittäminen runkoon ja lihakseen on haastavampaa ja ristikkonivelen saatavuus on heikompaa. Nivelpäätyjä valmistetaan suoraan M16 x 1,5 hienokierteellä, joten se sopii suoraan lihakseen kiinni. Nivelpäädyn toisessa päässä on 16 mm reikä, josta se voidaan kiinnittää runkoon ja liikkuvaan osaan. Nivelpääty mahdollistaa reiän ansiosta hyvin ylös – alas liikkeen, mutta sivulle päin se sallii 11 asteen liikkeen molemmille puolille. Kokonaisliike on 22 °, joten se on aivan riittävä. Nivel pääty on standardi osa, joten näitä on helposti saatavilla. Nivelpääty kestää staattisia kuormia 25 kN asti ja dynaamista kuormaa 21 kN asti [18]. Nivelpääty on kestovoideltu, joten se on huoltovapaa. Liikealustaan valitaan ilmalihaksen kiinnitys niveliksi nivelpääty, jossa on myös M16 x 1,5 sisäkierre, jotta se voidaan kiinnittää suoraan lihakseen M16 x 1,5 kierretangolla. Samalla, jos tarvetta on, voidaan toimilaitteen pituutta kasvattaa kierretangon avulla. Nyt lihaksen minimi kokonaispituus kasvaa 795 mm:iin kiinnityspisteiden välillä.

3.4.4. Perusosan rakenteen valinta

Nyt tiedossa on rajoittavat mitat liikealustaa varten. Liikealustan rakenteen tyyliksi valittiin Stewart-liikealusta. Siinä toimilaitteiden kiinnityspisteiden paikat sijaitsevat liikkuvassa osassa ja perusosassa ympyrän kehällä symmetrisesti kuten kuvassa 2.15. Nyt voidaan piirtää kuinka iso ympyrä, joka kuvaa perusosan kiinnityspisteiden kehää, mahtuu näyttöpintojen väliin. Kehän pitää olla mahdollisimman iso, jotta tukiala liikealustalle olisi mahdollisimman iso ja se voisi toteuttaa mahdollisimman isoja liikkeitä turvallisesti. Samalla myös mahdollistetaan liikkuvan osan olevan mahdollisimman iso.

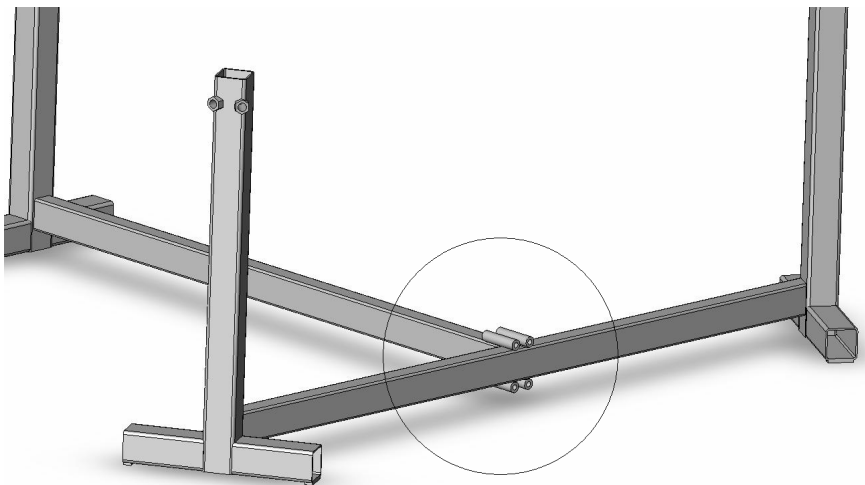
Stewart-liikealustan perusosassa on kolme kohtaa johon tulee pilari, johon toimilaitteet kiinnitetään. Pilarien sijoitusvaihtoehtoja on kaksi. Ensimmäisessä vaihtoehdossa pilari tulee keskimmäisen näyttöpinnan keskellä ja alapuolelle. Kaksi muuta pilaria tuli 120 asteen välein ympyrän kehälle symmetrisesti. Toisessa tavassa yksi pilari on takana ja kaksi pilari edessä. Ensimmäinen vaihtoehto on parempi, koska silloin saadaan liikkuvassa osassa oleva penkki lähemmäs näyttöpintoja, jolloin kuljettaja pystyy näkemään kaikki näyttöpinnat paremmin kyseisessä Toro-simulaattorissa.

Vierekkäiset kiinnityspisteet perusosassa tulevat olemaan samassa pilarissa. Tässä vaiheessa pitää myös miettiä tolpan rakennetta ja mitoittaa pisteiden välinen etäisyys sopivaksi runkorakenteeseen. Tukipilarin profiiliksi valittiin RHS-palkki 60 mm x 60 mm x 2,5 mm (leveys x korkeus x paksuus). Palkki valittiin, koska se on standarditavaraa ja sitä on helposti saatavilla ja se on edullinen. Lisäksi tähän kokoon

löytyy valmiiksi valmistuksessa olevia muovisia suojapäitä, jotka tulevat suojaksi pilarin päähän ja antavat viimeistellyn vaikutelman.

Lopuksi pitää suunnitella pilarien kiinnitys toisiinsa. Kiinnitys toisiinsa varmistaisi pilarien paikalla pysymisen ja tukisi pilareita. Pilarit muodostavat keskenään tasasivuisen kolmion. Tähän sopiva vaihtoehto on T-mallinen kiinnitys. Yksi palkki yhdistää kaksi pilaria ja yhdestä pilarista tulee palkki kohtisuorassa toiseen palkkiin, kuten kuvassa 3.3 Palkkien tarvitsee ottaa vastaan ja välittää pilarista aiheutuva momentti. Siksi siihen valitaan palkki, jonka poikkileikkauksen korkeus on suurempi kuin leveys. Palkiksi valittiin RHS-palkki 60 mm x 40 mm x 2 mm. Palkit kiinnitetään pilariin hitsaamalla ja liitetään toisiinsa liitoksella. Näin saadaan runko-osa pienempään tilaan kun sitä tarvitsee kuljettaa. Palkit hitsataan 55 mm korkeuteen alareunasta mitattuna, jotta sähköjohdot ja paineilmaletkut mahtuvat kulkemaan niiden ali ja eivät estä liikkuvaaosaa liikkumasta käytön aikana.

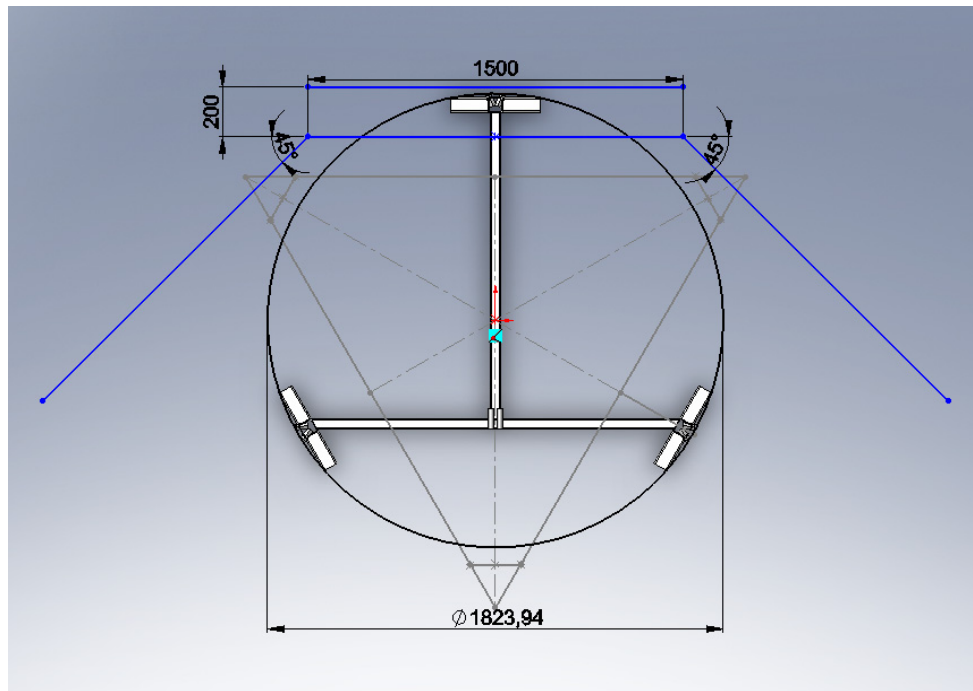
Liitoksen voisi toteuttaa laippaliitoksella, mutta laippa kiinnityksen valmistaminen vie enemmän aikaa. Ensiksi pitäisi sahata laipat muotoonsa ja sitten porata reiät oikeisiin kohtiin. Viimeisenä vaiheena olisi hitsaus tarkalleen valittuun kohtaan. Parempi liitos valmistuksen kannalta on hitsata molempiin palkkeihin neljä putken pätkää ja putkien sisälle pultilla kiinni toisiinsa. Kuvassa 3.3 on esitetty liitos ympyröitynä. Tämä vaihtoehto on nopeampi valmistaa ja asentaa. Tarvitsee ainoastaan sahata putket oikean mittaisiksi ja sitten kiinnittää ne toisiinsa pulteilla, jotta ovat oikeassa kohdassa. Tämän jälkeen hitsataan putki-pultti yhdistelmä liitoksen kohdalle. Kun kaikki neljä putkea on hitsattu, liitos on valmis. Tämän liitoksen etuna on, että putket kohdistetaan automaattisesti valmistuksen aikana, jolloin liitoksessa olevat pultit toimivat ongelmitta. Tähän valittiin putkeksi hydrauliliikkaputki 20x5, koska kiinnitys pultiksi tulisi tällöin sopivasti M10 ja pultin pää pystyy pyörimään vapaasti osumatta palkin reunaan, kun pulttia aukaistaan tai kiinnitetään.



Kuva 3.3 Liitos perusosassa.

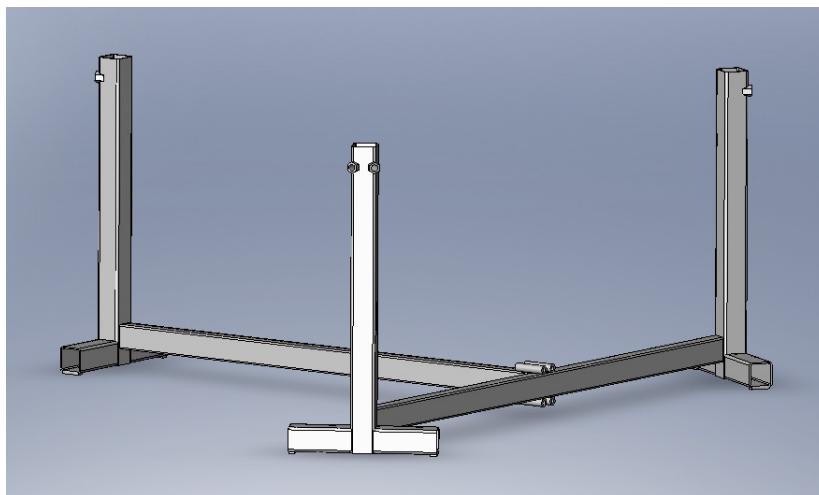
Lihaksien kiinnityksessä kannattaa hyödyntää lihaksien päihin tulevaa nivelpäässä olevaa reikää, joka mahdollistaa ison liikkeen ylös-alas suunnassa. Reiän halkaisija on 16 mm:ä. Reikään mahtuu hyvin M16 kierretanko. Kierretanko kiinnitetään runkoon M16 jatkomutterilla. Jatkomutteri hitsataan palkkiin tehtyyn reikään. Reikä tulee porata siten, että kiinnityspiste tulee palkin kylkien kohdalle eli pisteiden välinen etäisyys on 60mm:ä. Reikä joudutaan poraamaan hieman vinoon, jotta lihas osoittaisi suoraan vastaavaan kiinnitys kohtaan liikkuvaan osaan ollessaan perusasennossa. Lopullinen reiän vinous määräytyy kiinnityspisteiden perusteella. Poratun reiän halkaisija tulee olemaan 27 mm, koska jatkomutterin kulmien väli on 27 mm. Reikä tehdään tolpan yläreunasta 60 mm päähän. Näin varmistetaan palkin kestävyys, koska reiän ja reunan väliin pitää jättää vähintään reiän levyinen mitta ehjää rautaa. Reiän ansiosta saadaan jatkomutteri hyvin palkin sisälle halutulle syvyydelle. Jatkomutteri hitsataan palkkiin kiinni reiän reunoilta ulko- ja sisäpuolelta. Lisäksi mutterit hitsataan toisiinsa kiinni palkin sisällä. Lopullinen porauskulma saadaan, kun on mitoitettu liikealue ja kiinnityskohdat liikkuvaan osaan. Kierretanko kierretään jatkomutterin sisään. Sitten lihaksen nivelpääty tulee kierretangolle. Lopuksi kiristetään normaalilla M16 mutterilla kiinni, näin varmistetaan, ettei lihas pääse putoamaan. Kierretangon pituus on kaikkien osien pituus yhteensä eli $45\text{mm}+21\text{mm}+20\text{mm}$ on 86mm. Nivelpäädyn tulee päästä liikkumaan sivusuunnassakin, joten jatkomuttereihin ja normaaleihin muttereihin joudutaan tekemään 45 asteen viisteet. Näin nivelpääty pääsee liikkumaan tarpeeksi.

Perusosan mitoitus ratkaistaan piirtämällä perusosa ylhäältä päin näyttöpintojen kanssa. Näin voidaan tarkastella kuinka iso perusosa voidaan rakentaa. Kuvassa 3.4 on kyseinen piirros. Näyttöpintoja kuvaa siniset viivat. Lisäksi sinisellä on piirretty tila, jonka verran näyttöpintojen alle jää tilaa. Kuvaan on piirretty mustalla ympyrä, jonka kehälle kiinnityspisteet tulee, on halkaisijaltaan 1824 mm, joka määrää kaikkien muiden osien mitat. Tällöin liikealustan keskipiste on tarpeeksi keskellä, jotta kuljettaja näkee molemmat näyttöpinnat riittävästi. Samalla myös liikealustalle nousemista varten on riittävästi tilaa näyttöpintojen ja tolppien välissä. Kuvassa on myös hahmoteltu harmaalla liikkuvaa osaa, mutta sen suunnittelu tulee seuraavaksi.



Kuva 3.4 Perusosa ylhäältäpäin näyttöpintojen kanssa.

Perusosan kiinnityspisteet ovat ympyrän kehällä pilareissa 120 asteen symmetrisellä jaolla. Tolppien pitää mahtua näyttöpintojen alle, joten tolpat mitoitetaan 760 mm korkeiksi. Kiinnityspisteille on varattu 60 mm tolpan päästä eli tolppien pisteiden korkeus on 700 mm korkealla. Nyt mitoitukset ovat valmiina. Kuvassa 3.4 nähdään perusosan rakenne valmiina.



Kuva 3.5 Perusosan rakenne valmiina.

3.4.5. Liikkuvanosan rakenteen valinta

Vaikka kiinnityspisteiden lopullista paikkaa ei vielä tiedetä, voidaan liikkuvan osan tyyli ja rakenne suunnitella. Pisteiden paikka määrää ainoastaan kolmion sivujen pituuden, kuten perusosassakin.

Liikkuvan osan osan tarvitsee kyetä kannattelemaan ohjaamopenkin ja ihmisen massa, joka oli yhteensä 160 kg, mutta laskuissa voidaan käyttää 300 kg:a. Huomioon pitää ottaa myös se, ettei massakeskipiste saa ylittää tukipisteitä. Liikkuvanosan kiinnityspisteet sijaitsevat vastaavasti ympyrän kehällä, kuten perusosassakin. Kiinnityspisteiden välinen etäisyys ei tarvitse olla sama kuin perusosassa. Tyyli liikkuvaan osaan kannattaa ottaa sama kuin perusosassakin eli tasasivuinen kolmio. Kiinnitys pisteet yhdistetään toisiinsa kolmion mallisella rungolla. Kolmiorunko mahdollistaa isomman ympyrän säteen eli pisteet voidaan sijoittaa laajemmalle, josta seuraa, että tukipinta-ala kasvaa. Ympyrän mallinen liikkuvaosa on muutenkin haastava valmistaa ja materiaalia kuluisi enemmän. Kolmion suuruus ei kuitenkaan saa olla niin iso, että se ottaisi perusosan tolppiin kiinni.

Ohjaamon penkki pitää kiinnittää liikkuvaan osaan siten, että massakeskipiste tulisi kolmion ja samalla liikkuvanosan keskelle. Näin massakeskipisteellä on yhtä pitkä matka kolmion kylkiin symmetrisesti ja voidaan tuottaa samansuuruisia liikkeitä kaikkiin suuntiin. Massakeskipisteen koordinaatit penkin ja ihmisen koordinaatistossa olivat (-112,5 mm, 1050 mm, 0 mm) (x, y, z) eli penkki pitää asentaa 112,5 mm näyttöpintoihin päin. Tämä on hyvä asia, koska silloin ohjaajalla on isompi näkökenttä oikealle ja vasemmalle, juuri sitä mitä simulaattorissa tarvitaankin.

Penkkiä ei voida suoraan kiinnittää liikkuvanalustan pohjatasolle, koska penkin korkeus on 600 mm ja istuinkorkeus Torossa on 800 mm. Penkille tarvitsee suunnitella koroke. Penkin kiinnittäminen onnistuu helposti M10 pulteilla, koska penkin pohjassa on levy, jossa on paljon kiinnitystä varten olevia reikiä. Reikiä on kahta eri kokoa, mutta käytetään niistä ainoastaan neljää, joiden halkaisija on 10 mm. Reiät muodostavat suorakulmaisen alueen ja reiät sijaitsevat levyn kulmissa. Suorakulmion mitat ovat 200 mm x 300 mm. Penkin levyllä tehdään vastaavan suuruinen koroke, johon pultit voidaan kiristää ja penkki kiinnittää. Materiaaliksi korokkeelle valittiin 20 mm x 20 mm x 1,5 mm (leveys x korkeus x paksuus) RHS-palkin. Tämä siksi, että palkin sisämitta on 17 mm eli tilaa juuri M10 mutterille ja palkki kestää penkistä ja ihmisestä aiheutuvan kuorman. Pultin kiinnittämistä varten palkkiin tarvitsee ainoastaan porata neljä reikää. Mutteri voidaan hitsata palkin sisälle ja näin asennus on nopeata ja helppoa. Korokkeen korkeus on 200 mm, jotta istuinkorkeus on oikea. Palkit kiinnitetään toisiin hitsaamalla. Varmistukseksi ja muodon ylläpitämiseksi korokkeen jalkoihin hitsataan vinot tukipalkit samasta palkki materiaalista. Koroke itsessään ilman tukia kestää kuorman, mutta tuilla halutaan varmistaa penkin pysyvyys paikalla ja koska ihminen on kyydissä, varmuutta pitää lisätä. Korokkeen kiinnittäminen runkoon tapahtuu myös hitsaamalla.

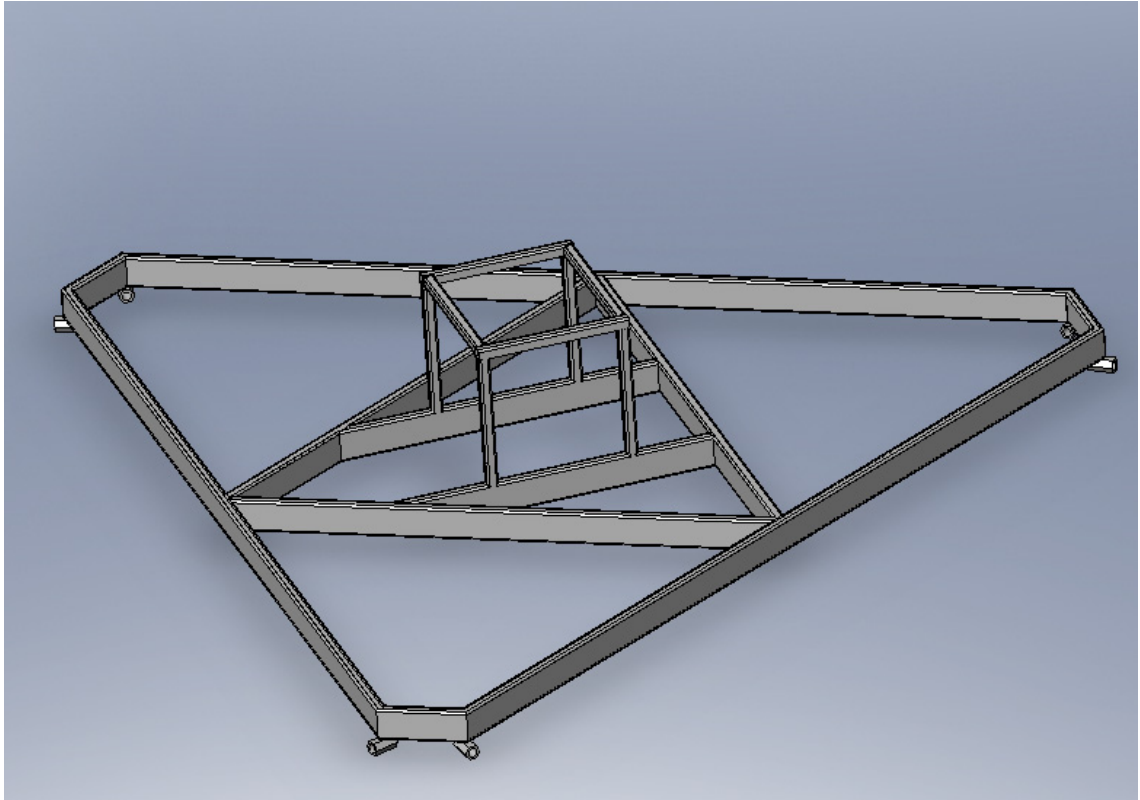
Liikkuvanosan runko on tyyliiltään tasasivuinen kolmio. Kolmion kärjet ovat siis 60 astetta. Kiinnityspisteitä ei kannata laittaa ihan kiinni toisiinsa. Jos kiinnityspisteet olisivat kiinni toisissaan, silloin liikealustaan astuminen olisi hankalaa ja pitäisi väistellä

ilmalihaksia liikealustaan astuessaan. Kiinnityspisteiden väliin kannattaa jättää isompi väli käytettävyyden takia. Tähän ei ole tarkkaa mitoitusapaa, mutta kiinnityspisteiden väliin jätetään 200 mm tilaa. Tämä on riittävästi yhtä jalkaa varten ja toisaalta se ei ole ahtaan tuntuinen. Näin voidaan muuttaa liikkuvanosan rungon tyyliä siten, että kolmion terävät kärjet viistetään. Kärkiin tulee noin 200 mm tylppä osa. Nyt meillä on siis kuusikulmainen osa.

Rungon palkiksi valitaan 60 mm x 20 mm x 2,5 mm (korkeus x leveys x paksuus) RHS-palkki. Rungon pitää kestää suurta taivutusta ja momentteja, jotka aiheutuvat penkistä ja kuljettajasta. Palkin painon huomioiden sen kantokykyyn on tärkeää, että palkki on huomattavasti korkeampi kuin leveämpi. Palkki kiertää rungon ääriivivoja pitkin eli muodostaa kuusikulmion kuten edellä mainittiin. Lisäksi liikkuvaa osaa vahvistetaan kuusikulmaisen sisälle tehtävän kolmion muotoisella tukialueella. Tämä on tuttu ristikkorakenne ja tämä jäykistää runkoa hyvin. Liikealustaan noustessa liikkuvanosan päältä joudutaan myös kävelemään, joten liikkuvanosan päälle tulee levy. Kolmion mallinen palkki rakenne tukee myös levyä, ettei se taivu, kun sen päällä kävellään. Vahvistus palkit tehdään samasta materiaalista kuin muukin runko. Näiden palkkien lisäksi liikkuvanosan runkoon tehdään koroketta varten kaksi suoraa palkkia, jotka kulkevat suoraan penkin korokkeen jalkojen alta. Näin koroke saadaan liitettyä jäykästi runkoon. Kuormakin välittyy suoraan runkoon ja sitä pitkin kiinnityspisteisiin ja sitä kautta taas toimilaitteisiin ja sieltä perusosaan ja sieltä lopuksi maahan.

Kiinnityspisteiden paikan ja liikealueen määrittämisen jälkeen tiedetään ympyrän säteet, jolla kiinnityspisteet sijaitsevat. Sen jälkeen on tiedossa myös liikkuvan osan sivujen pituudet. Liikkuvan osan FEM-tarkastelu tehdään vasta sen jälkeen, kun tiedetään tarkka mitoitus.

Kiinnitys lihakseen tapahtuu samalla tavalla kuin perusosaankin eli M16 jatkomuttereilla. Runkoon ei nyt porata reikiä vaan hitsataan ne suoraan liikkuvanosan rungon alle. Näin asennus helpottuu. Jatkomutterit hitsataan samalla tavalla vinoon, jotta lihas olisi valmiiksi suorassa toisen pään kiinnityskohtaa neutraalitulassa.

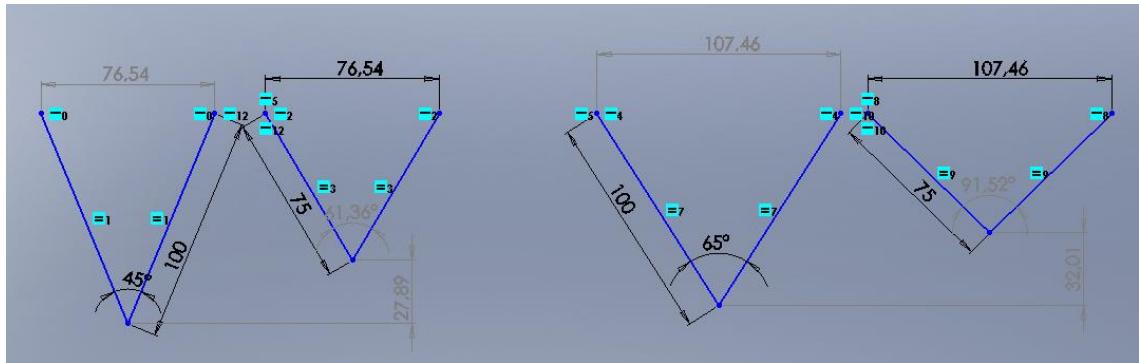


Kuva 3.6 Liikkuvanosan runko

Kuvassa 3.6 nähdään valmis rakenne liikkuvaosa ilman penkkiä ja peitelevyä. Kiinnityspisteet sijaitsevat ympyrän kehällä, joten rungon mitoituksessa vain kolmion kylkien pituudet muuttuvat.

3.4.6. Liikkuvan osan mitoitus

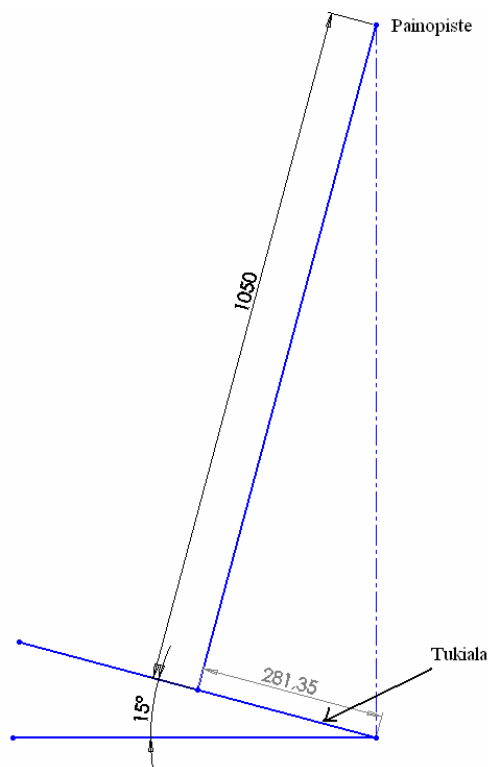
Jotta liikkuvanosan liikealue olisi mahdollisimman suuri, translaatioliikkeen Y-akselin suhteen, eli ylös alas suunnassa, pitää olla mahdollisimman iso. Tämä vaikuttaa samalla myös rotaatioliikkeiden suuruuteen, koska liikealustan kallistuksessa toisen puolen kiinnityspisteet ovat alhaalla ja toiset ylhäällä. Jotta kiinnityspisteet saadaan liikutettua mahdollisimman ylös, niin kiinnityspisteiden välinen etäisyys liikealustassa pitäisi olla mahdollisimman iso. Kuvassa 3.7 nähdään periaate miten lihasten välinen kulma vaikuttaa kiinnityspisteiden korkeuteen. Tässä rajoittavana ja haastavana tekijänä on kuorman kasvaminen kulman suuretessa toimilaitteelle. Kuorman suureneminen ei rakenteelle ole ongelma, mutta toimilaitte hidastuu mitä suurempaa kuormaa sen pitää kannatella. Kuvassa toimilaitteet on piirretty sinisellä viivalla. Ja toimilaitteet on kiinnitetty samaan kiinnityspisteeseen selkeyden vuoksi.



Kuva 3.7 Periaatekuva kiinnityspisteen matkasta toimilaitteiden asennuskulmasta riippuen.

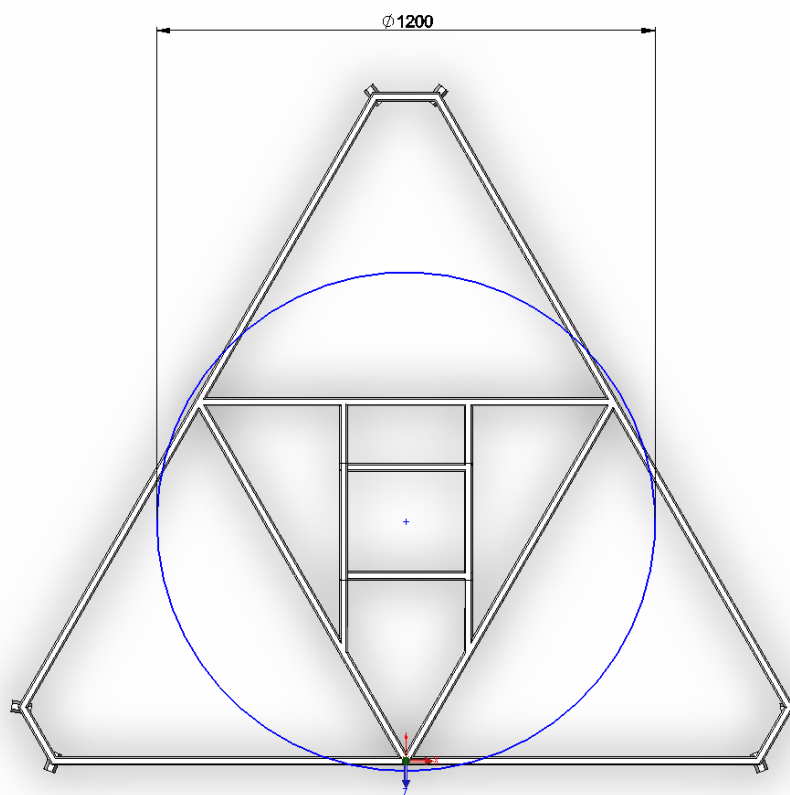
Maksimaaliseen korkeuteen vaikuttaa lihaksen kokonaispituus. Lihas kannattaa mitoittaa siten, että liikealustan ollessa perustilassa eli sen kyytiin nousta tai poistutaan, liikkuvanosan alaosa ottaa tukea perusosan tukirakenteesta. Näin voidaan varmistua, ettei liikealusta keikahda kun kyytiin nousta ja kuorma/painopiste on eri paikassa kuin suunniteltu istumatilanne.

Liikkuvanosan mitoituksen ensimmäinen vaihe on tarkastella painopisteen vaikutusta vaadittavaan tukipinta-alaan, joka on kiinnityspisteiden väliin jäävä alue. Kuvassa 3.8 nähdään viidentoista asteen kulman vaikutus painopisteeseen, joka on 1050 mm korkealla. Voidaan laskea pythagoran avulla, että tukialueen pitää olla vähintään noin 300 mm.



Kuva 3.8 Periaatekuva painopisteen vaatimasta tukialasta.

Liikealustan turvallisuuden takaamiseksi tukialueen pitää olla vähintään kolminkertainen matka eli 900 mm. Tämä siksi, että henkilön ollessa liikealustalla hän saattaa liikkua ei-ennakoidulla tavalla ja näin painopiste voi muuttua radikaalistikin. Jos ei olisi riittävää turva-aluetta, liikealusta keikahtaisi. Samalla myös ennakoitaan tulevia käyttökohteita liikealustalle, ja silloin istuin- tai seisonnapaikka voi olla aivan eri paikassa, mutta liikealusta olisi käytettävissä. Liikkuvan osan keskipisteen ympärille piirretään ympyrän, jonka säde on 600 mm. Tästä nähdään milloin kiinnityspisteet ja niiden väliset suorat ovat ympyrän ulkopuolella. Kuvassa 3.9 on esitetty ympyrän kehä ja liikkuvan osan rakenne. Rajoittavana tekijänä sivujen kasvattamisessa tulee se, että liikkuvaosa kasvaa niin suureksi, että liikkeessä se törmää perusosan tolppiin. Tämä pitää huomioida myös.

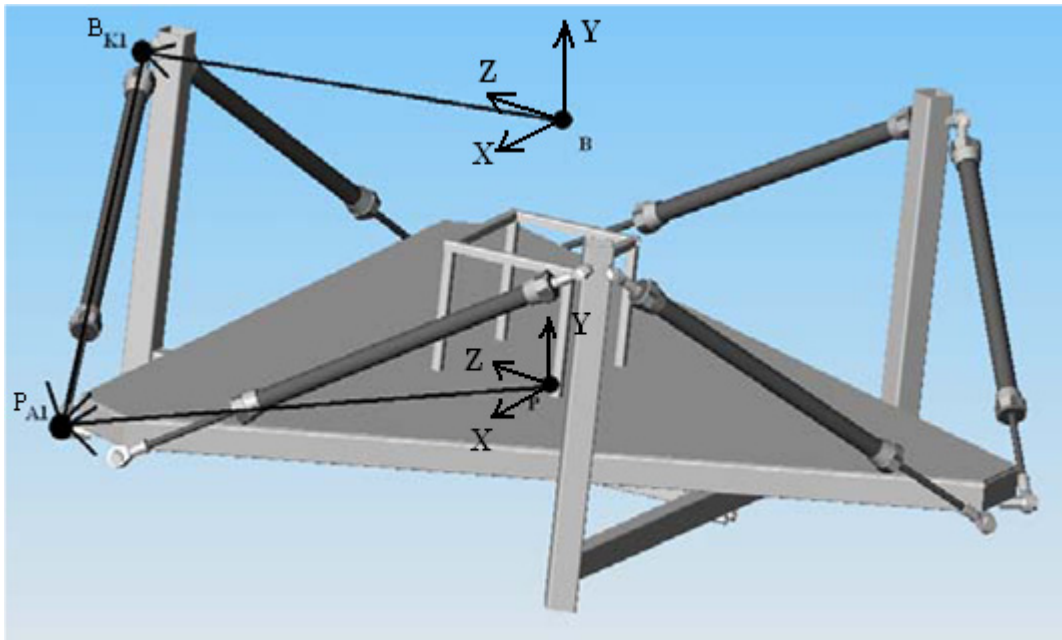


Kuva 3.9 Liikkuvaosa ja tukipinta-alan ympyrä.

Seuraavaksi optimoidaan kiinnityspisteiden paikka liikkuvan osan sivujen paikassa. Aikaisemmin todettiin, että pisteiden tulisi olla mahdollisimman etäällä toisistaan, jotta z-suuntainen translaatioliike olisi mahdollisimman suuri. Asetetaan kiinnityspisteet mahdollisimman kauas eli 1720 mm päähän toisistaan. Nyt voidaan tehdä laskentamalli ja tarkastaa kuorma, joka kohdistuu toimilaitteeseen. Samalla tulee laskettua toimilaitteen kokonaispituus.

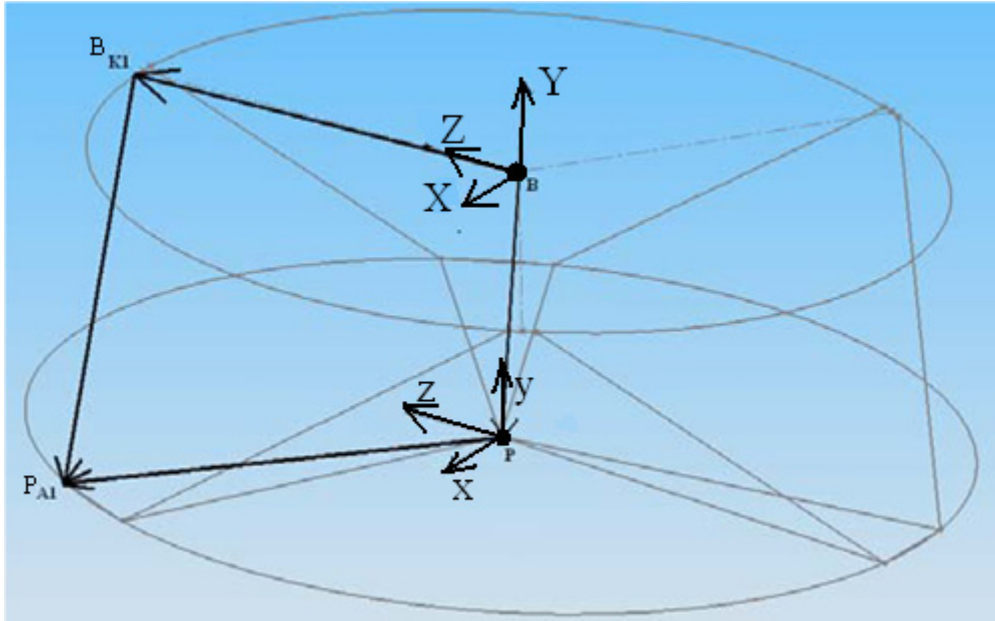
3.4.7. Matemaattinen malli

Laskentamallissa määritetään vektorit perusosan kiinnityspisteistä liikkuvan osan kiinnityspisteisiin. Näin saadaan selville kuorma perustilassa. Seuraavaksi lasketaan toimilaitteiden kuormitus, kun kaikki lihakset ovat minimipituudessaan eli liikkuva osa on ylimmillään, jolloin kuorma on suurin kaikissa toimilaitteissa. Tämä on tilanne, joka on haastavin toimilaitteen kannalta, koska lihaksen pitää olla lyhimmillään ja siihen kohdistuu iso kuorma. Isoin kuorma lihakseen kohdistuu silloin kuin liikkuva osa on mahdollisimman kallistuneena johonkin äärisuuntaan. Lihakset, jotka ovat kiinni liikkuvan osan alhaalla olevalla puolella, joutuvat kantamaan silloin isoimman kuorman, mutta silloin lihaksen pituus on pidempi, jolloin siihen ei tarvitse johtaa niin paljon ilmaa. Eli kriittisin tilanne paineilman tarpeelta on, kun liikkuvaosa on aivan ylhäällä. Laskentamallista nähdään myös liikealustan liikealueet.



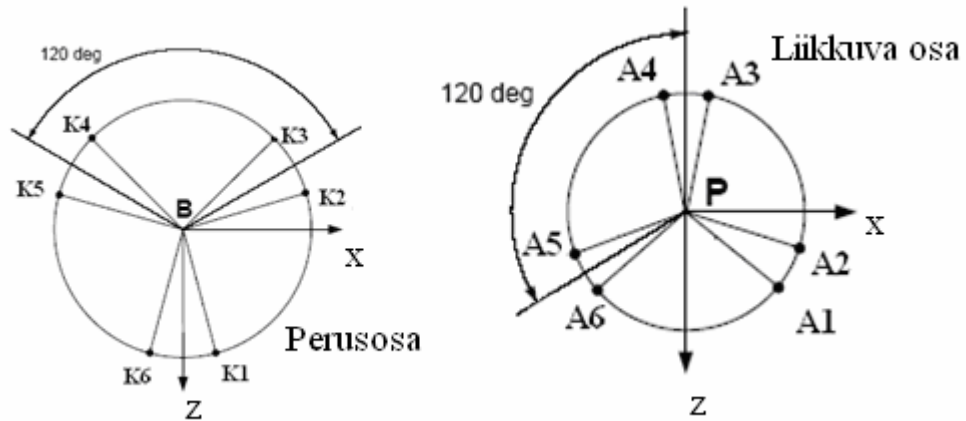
Kuva 3.10 Liikealustan koordinaatistojen origot ja vektorit kiinnityspisteisiin ja toimilaitteen vektori.

Laskentamallissa perusosa ja liikkuva osa ovat eri koordinaatistossa. Kuvassa 3.10 on esitetty koordinaatistojen origot ja vektorit kiinnityspisteisiin ja niiden välinen vektori. $\{B\}$ on perusosan origo ja vastaavasti $\{P\}$ on liikkuvan osan origo. $K1$ piste on kiinnityspiste perusosassa ja $A1$ on kiinnityspiste liikkuvassa osassa. Numerot kuvaavat kiinnityspisteen paikkaa ja samalla toimilaitteen numeroa, joka on kiinni pisteissä. Kuvassa 3.11 on kuvattu samat pisteet rautalankamallissa ja kuvassa näkyy myös koordinaatistojen suunnat.



Kuva 3.11 Vastaava kuva kuin 3.10, mutta rautalankamallina. Lisäksi koordinaattiakselit.

Kuvassa 3.12 nähdään kiinnityspisteiden numerointi sekä liikkuvassa- että perusosassa. Numerointi on vastapäivään suureneva. Kuvassa on myös esitetty kiinnityspisteiden 120 asteen välinen kulma. Liikealustan Z-akseli osoittaa siis näyttöpintaan päin ja y-akselit osoittavat paperista ylöspäin. Lihakset ovat myös numeroitu. Lihaksen numero riippuu, missä kiinnityspisteessä se on kiinni. Esimerkiksi lihas numero 1 on kiinni K1 ja A1 ja numero 2 on kiinni K2 ja A2 ja niin edelleen.



Kuva 3.12 Liikealustan kiinnityspisteiden numerointi. Vasemmalla perusosan pisteet ja oikealla liikkuvan osan.

Liikealustan kiinnityspisteiden välinen vektori, eli pisteiden $\{K_i\}$ ja $\{A_i\}$ välillä:

$${}^B \mathbf{KA}_i = (KA_i \ KA_i \ KA_i)^T \quad (1)$$

on koordinaatistossa $\{B\}$. Vektorissa on x, y, z komponentit. Vektori kuvaa toimilaitteen pituutta. Koska liikkuvan osan kiinnityspisteitä ei tunneta koordinaatistossa $\{B\}$, pitää liikkuvan osan kiinnityspisteet siirtää ja kiertää koordinaatistoon $\{B\}$. Kiinnityspisteiden kuvaus $\{B\}$:n koordinaatistossa:

$$\begin{aligned} {}^B \mathbf{KA}_i &= {}^B \mathbf{R}^P \mathbf{PA}_i + {}^B \mathbf{BP} - {}^B \mathbf{BK}_i \\ {}^B \mathbf{BP} &= [x \ y \ z]^T \end{aligned} \quad (2)$$

jossa ${}^B \mathbf{BP}$ on liikkuvan koordinaatiston $\{P\}$ stranslaatiomatriisi koordinaatistoon $\{B\}$. Vektori:

$${}^P \mathbf{PA}_i = [PA_{ix} \ PA_{iy} \ PA_{iz}]^T \quad (3)$$

kuvaa kiinnityspisteen $\{A_i\}$ koordinaatit $\{P\}$:n koordinaatistossa. Ja vektori:

$${}^B \mathbf{BK}_i = [BK_{ix} \ BK_{iy} \ BK_{iz}]^T \quad (4)$$

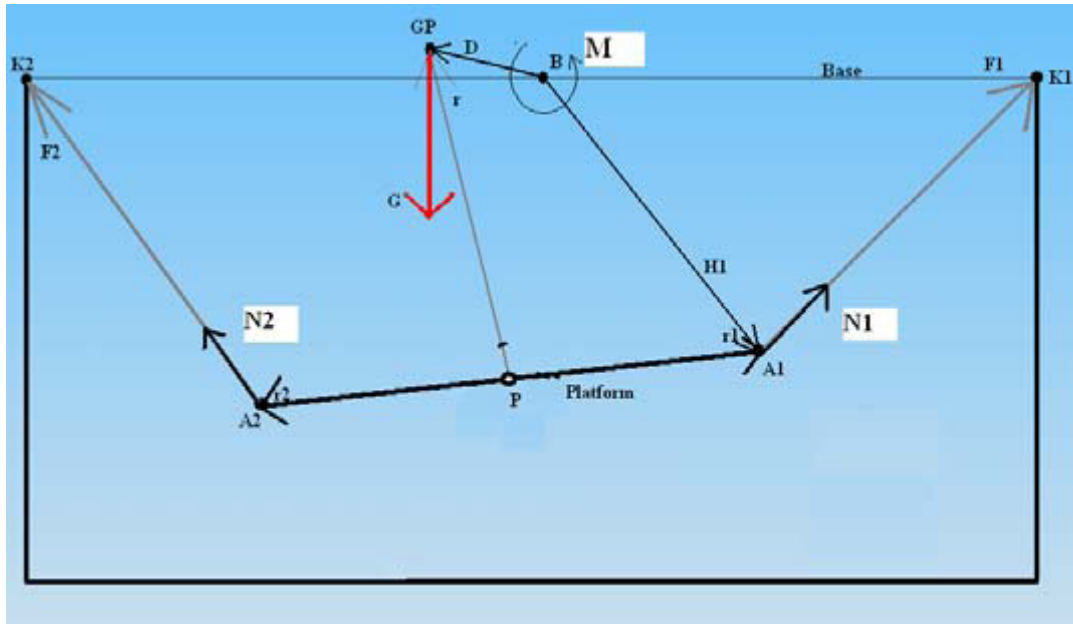
kuvaa kiinnityspistettä $\{K_i\}$ koordinaatistossa $\{B\}$. Kääntömatriisi on muotoa:

$${}^B_P \mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

Kääntömatriisissa α =(Roll/x_kulma), γ =(Yaw/y_kulma) and β =(Pitch/z_kulma), kuvaavat liikkuvan osan X-, Y- ja Z-akselien kiertymiä suhteessa perusosan koordinaatistoon $\{B\}$. Ja c kuvaa cosinia ja s siniä. Toimilaitteen i kokonaispituus voidaan laskea kaavalla:

$$l_i = \| {}^B \mathbf{KA}_i \| \quad (6)$$

Laskemalla toimilaitteiden pituudet, ratkaistaan käännteiskinematiikka liikealustalle. Lisäksi tarvitaan voimat jokaiselle toimilaitteelle. Voimien ratkaisemiseksi käytetään hyväksi tasapainotilannetta, jolloin voimien resultantti pitää olla nolla. Tasapainotilanteessa myös momenttien yhteisvaikutus tietyssä pisteessä pitää olla nolla [19]. Kuvassa 3.13 nähdään periaatekuva liikealustan voimista. Kuvaa on yksinkertaistettu kaksikulotteiseksi asian selkeyttämisen takia. Kuvassa on vain kaksi toimilaitetta kuuden sijasta. Massakeskipistettä kuvaa piste $\{GP\}$. Punainen vektori kuvaa painovoimasta aiheutuvaa voimaa \mathbf{G} . Voimavektori \mathbf{F} sisältää tuntemattomat voimakomponentit x- y- ja z-suunnista.



Kuva 3.13 Liikealustan periaatekuva tasapainotilanteesta ja voimista

Painovoima aiheuttaa momentin ${}^B\mathbf{M}_g$ koordinaatiston origoon $\{B\}$, joka on:

$${}^B\mathbf{M}_g = {}^B\mathbf{D} \times {}^B\mathbf{G} \quad (7)$$

Jossa ${}^B\mathbf{D}$ on vektori koordinaatiston $\{B\}$ origosta massakeskipisteeseen. Toimilaitteen ja samalla voimien suuntavektorin yksikkövektori on:

$${}^B\mathbf{N}_i = \frac{-{}^B\mathbf{K}\mathbf{A}_i}{\|{}^B\mathbf{K}\mathbf{A}_i\|} \quad (8)$$

Toimilaitteiden aiheuttama momenttivektori pisteessä $\{B\}$ on:

$${}^B\mathbf{M}_i = {}^B\mathbf{H}_i \times {}^B\mathbf{N}_i \quad (9)$$

${}^B\mathbf{H}_i$ on vektori voiman liikkuvan osan vaikutuspisteestä momentin laskentapisteeseen, kuten kuvassa 3.13. Tasapainotilanteessa voimien aiheuttama voimaresultantti on nolla:

$$\sum F_i \cdot {}^B\mathbf{N}_i - {}^B\mathbf{G} = 0 \quad (10)$$

Myös momenttien suuruus pisteessä $\{\mathbf{B}\}$ pitää olla nolla tasapainotilanteessa:

$$\sum F_i \cdot {}^B \mathbf{M}_i - {}^B \mathbf{M}_g = 0 \quad (11)$$

Toimilaitteiden aiheuttamien momenttien ja voimien suunnat tunnetaan ja suuruus pitää laskea. Muodostetaan (6 x 6) matriisi \mathbf{K} .

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} M_1^x & M_2^x & M_3^x & M_4^x & M_5^x & M_6^x \\ M_1^y & M_2^y & M_3^y & M_4^y & M_5^y & M_6^y \\ M_1^z & M_2^z & M_3^z & M_4^z & M_5^z & M_6^z \\ N_1^x & N_2^x & N_3^x & N_4^x & N_5^x & N_6^x \\ N_1^y & N_2^y & N_3^y & N_4^y & N_5^y & N_6^y \\ N_1^z & N_2^z & N_3^z & N_4^z & N_5^z & N_6^z \end{pmatrix} \quad (12)$$

Matriisien \mathbf{F} ja \mathbf{K} pistetulo on matriisi \mathbf{R} . Matriisi \mathbf{R} voidaan myös määritellä olevan painovoiman aiheuttaman momenttien ja voimien komponentit $\{\mathbf{B}\}$ koordinaatistossa:

$$\mathbf{R} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{F} = \begin{bmatrix} {}^B \mathbf{M}_g \\ {}^B \mathbf{G} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Toimilaitteiden voimien matriisi voidaan ratkaista seuraavasta:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{R} \quad (14)$$

Mallintamalla kolmannen asteen polynomifunktiolla ilmalihaksen painekäyrät voidaan laskea lihaksen voiman tuotto halutussa pisteessä [16]. Lihaksen voima voidaan kirjoittaa lihaksen pituuden kolmannen asteen polynomifunktiona:

$$F_{\max}(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \quad (15)$$

Jossa x on lihaksen pituuden muutos. Lihaksen tuottama voima voidaan kirjoittaa pituuden muutoksen funktiona:

$$F_{\text{lihas}} = F_{\max}(x) - (p_{\max} - p_m) \left(\frac{k_0 - k_1 x}{k_2} \right) \quad (16)$$

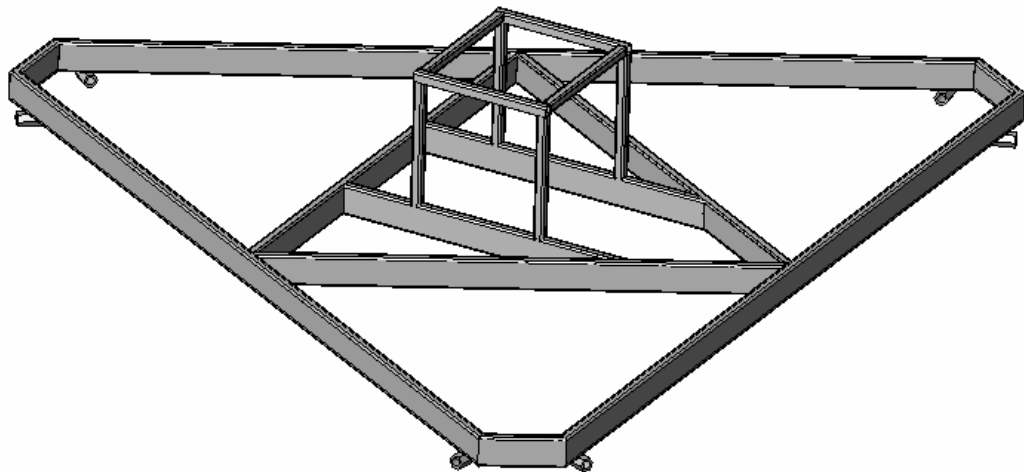
Jossa p_{\max} on maksimi paine eli 6 bar ja p_m on estimoitu paine. Kertoimet k_0 (N), k_1 (N/m) k_2 (Pa) saadaan pienimmän neliösumman menetelmällä. Tarvittavat muuttuja on lihaksen pituus ja kuorma. Matemaattinen malli ratkaisee liikealustan

käänteiskinematiikan ja toimilaitteille kohdistuvat kuormat. Näin saadaan ratkaistua tarvittava paine lihakselle tietyissä tilanteissa.

Nyt tiedossa on malli, jolla voidaan laskea toimilaitteisiin kohdistuvat kuormat ja toimilaitteiden pituudet. Mallilla voidaan myös tarkastella millaisiin kulmiin toimilaite kykenee.

3.4.8. Kiinnityspisteiden optimointi ja kuormitusten tarkastelu

Matemaattisen mallin jälkeen huomattiin, että toimilaitteille tulee hieman liian suuri kuorma. Tämä johtui lihasten hieman liian isosta asennuskulmasta. Tästä syystä päätettiin siirtää kiinnitys kohtia liikkuvanosan kulmista hieman sisäänpäin. Kuvassa 3.14 nähdään kiinnityspisteiden uusi paikka. Syynä oli myös nivelpäiden tuleminen liian ulos rungon alta. Tämä oli lähinnä ulkonäkökysymys, mutta laitteen pitää olla mahdollisimman huomaamaton.



Kuva 3.14 Liikkuvanosan runko uusilla kiinnityskohdilla.

Uusien kiinnityspisteiden ansiosta kiinnityskohdat ovat hieman huomaamattomammat ja liikealustalle on helpompi astua kyytiin. Lihaksiin kohdistuvan kuorman pienenemisen takia lihaksen toiminta nopeutui. Uusien kiinnityspisteiden ansiosta liikealusta kykenee tuottamaan teoriassa matemaattisen mallin avulla tarkasteltuna x-akselin ympäri $\pm 8^\circ$ käännön, y-akselin ympäri $\pm 5^\circ$ ja z-akselin ympäri positiiviseen suuntaan eli näyttöpintaan päin 7° kulman ja negatiiviseen suuntaan 8° kulman. Translaatio liikkeissä se kykenee tuottamaan ± 80 mm liikkeen x-akselin suuntaan, y-akselin suuntaan se pystyy tuottamaan ± 120 mm liikkeen ja z-akselin suhteen ± 70 mm liikkeen. Liikealueeseen vaikuttaa suuresti kuinka hyvin ohjauskäyrät on kyetty mallintamaan eli kuinka hyvin parametrit on saatu kohdalleen. Liikealustalle voidaan ajaa myös isompia kulmia, jolloin se pitää lihakset, joissa on täydet paineet,

täysinäisinä, mutta päästää muista pois, jos on tarpeen. Tällöin toiminta ei ole enää tietyn pisteen ympäri ja tulee virhettä liikkeisiin. Jos laitteeseen ajetaan ylikulmia, se kykenee X-akselin ympäri $\pm 10^\circ$ kulmaan, Y-akselin ympäri samaan eli $\pm 5^\circ$, ja Z-akselin ympäri 15° kulman positiiviseen suuntaan ja negatiiviseen suuntaan 12° kulmaan.

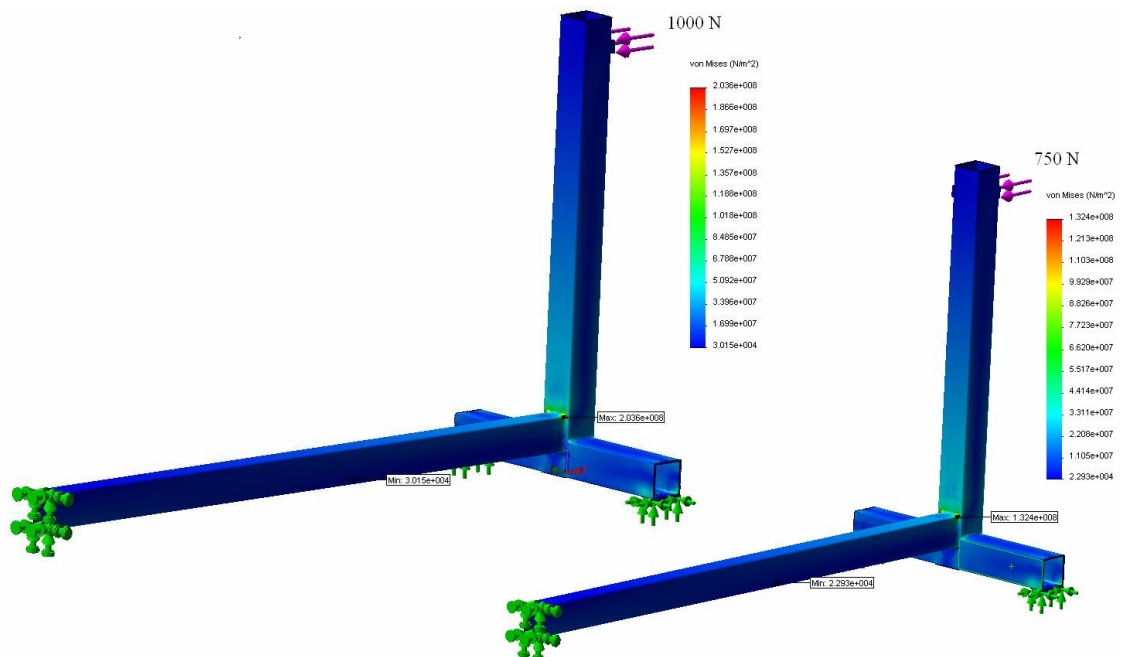
Taulukko 3.1 Lihasten kuormitus eri tilanteissa.

| Tulokset Newton (N) | | Liike | | | | | | | |
|------------------------|---|------------------------|-------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|-------------|
| | | Kierro akselien ympäri | | | | Translaatio akselin suhteen | | | Alkutilanne |
| | | X | neg X | Y | Z | X | Y | Z | |
| Lihaksen numero | 1 | 534 | 701 | 624 | 596 | 717 | 805 | 616 | 624 |
| | 2 | 673 | 666 | 677 | 607 | 741 | 871 | 600 | 675 |
| | 3 | 818 | 713 | 758 | 709 | 718 | 982 | 838 | 761 |
| | 4 | 818 | 713 | 758 | 808 | 795 | 982 | 838 | 761 |
| | 5 | 673 | 666 | 667 | 746 | 615 | 871 | 600 | 675 |
| | 6 | 534 | 701 | 617 | 644 | 518 | 805 | 616 | 624 |

Lihasten kuormitusten tila on esitetty taulukossa 3.1. Tarkastelua varten kierto X-akselin ympäri tarvitsi tehdä sekä positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan, koska lihakset eivät olleet symmetrisesti sen akselin suhteen. Muissa kierroissa ja akselin translaatioliikkeissä riitti tarkastelu vain positiiviseen suuntaan, symmetrian takia. Liikkeet ovat toteutettu edellä mainittujen maksimaalisten arvojen suhteen. Translaatio liikettä alaspäin eli Y-akselin negatiiviseen suuntaa ei myöskään tarvinnut tarkastella, koska arvot pienenevät alaspäin mentäessä. Lisäksi taulukkoon on lisätty alkutilanne mistä liike alusta lähtee tuottamaan liikkeitä. Taulukosta nähdään maksimaalisen kuorman olevan, kun liikealusta on ylhäällä. Edellä mainittua tilannetta tulee todella harvoin. keskimääräinen kuorma lihaksille näyttäisi olevan noin 600 - 700 N/lihas.

Kuvassa 3.15 nähdään perusosan tolpan FEM-tarkastelu. Voiman suuntana käytettiin kuvassa näkyvän violetin nuolen suuntaa. Tämä valittiin tarkasteluun sen takia, koska alaspäin suuntautuva voima kohdistuu lattiaan ja antaa tukivoiman liikealustalle. Tolppaan kiinnitettyjen lihasten sivuille päin suuntautuvat voimat ovat suurin piirtein saman suuruiset ja kumoavat toisensa. Suurin kuormitus suunta on violetin nuolen osoittama suunta, eli tolpan taipuma liikealustan keskustaa kohden. Tarkastelussa käytettiin taulukosta 1 nähtyä suurinta kuormitustilannetta eli liikkuvan osan ollessa ylhäällä. Suurin lihakselle aiheutuva kuorma on 982 N. Käytetään tarkastelussa 1000 N. Nuolen osoittama komponentti on noin 350 N:a. Kahden lihaksen aiheuttama voima on 700 N:a. FEM- tarkastelussa käytetään arvoa 750 N varmuuden vuoksi. FEM-tarkastelusta saatiin maksimi von Mises jännitykseksi $1,324 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Jännitys sijaitsee hitsausliitoksessa pistemäisenä. Hitsisauman paksuutta kasvattamalla jännityspiste pienenee. Palkkiin kohdistuva jännitys on maksimissaan noin $8,826 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$. Materiaalin myötöraja on $2,4128 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Varmuudeksi saadaan 2,7. Kuvassa on myös

kuormitus tilanne suoraan 1000 N:lla ja silloinkin maksimaalinen jännitys on samassa hitsissä. Jännitys on $2,036 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ 1000 N kuormalla. Rakenne kestää myös tämän.



Kuva 3.15 FEM-tarkastelu perusosan tolpast.

3.5. Pneumatiikan suunnittelu ja mitoitus

Liikealustaan valittiin pneumaattisesti toimivat ilmalihakset. Virtuaalilaboratoriossa oli valmiudet paineilmaverkkoon, joten erillistä koneikkoa ei tarvitse suunnitella. Paineilmaverkon syöttö paine on 7 bar. Toimilaitteiden toiminta-alue oli 0-6 bar:a, joten tämä sopi hyvin.

Lihaksien suurin ilmantarve on, kun lihakset täyttyvät pisimmästä mitastaan lyhimpään mittaan. Eli 500 mm kumiosa lyhenee 375 mm mittaan. Matemaattisen mallin avulla voidaan laskea kuormitukset sekä alhaalla ja ylhäällä. Sen jälkeen voidaan siirtää tiedot Feston omaan ohjelmaan joka laskee ilman kulutuksen. Ohjelma tarvitsee alkuarvoiksi kuormat alku- ja lopputilanteesta, sekä iskunpituuden ja paineet alku- ja lopputilanteessa. Tulokseksi saatiin 8 litraa yhdelle lihakselle liikkeen tuottamiseksi. Tämä voidaan kertoa kuudella, jotta saataisiin kaikkien kuuden lihaksen käyttämä ilma eli 48 litraa. Eli tarvitaan noin 48 litraa ilmaa tuottamaan äärimmäinen liike. Jos ajatellaan, että tämä liike pitäisi toteuttaa 0,5 s, niin tilavuusvirran pitäisi olla 96 l/s eli 576 l/min. Näin suurta tilavuusvirtaa siis ei tarvita jatkuvasti. Todellista kulutusta on lähes mahdotonta sanoa, koska se riippuu täysin toteutetuista liikkeistä ja kulmien suuruudesta. Isojen kulmien toteuttamisessa toiset lihakset supistuvat eli tarvitsevat ilmaa ja toiset taas pitenevät eli päästävät ilmaa pois. Venttiilien valinnassa on tärkeää huomioida, että mitä suurempi tilavuusvirran suuruus niin sitä nopeampia liikkeitä.

3.5.1. Toimilaitteiden venttiilien valinta

Toimilaitteiden venttiilien valintaa koski yksi tärkeä asia, toimilaitteiden ohjaus. Vaihtoehtoina on rakentaa monimutkaisempi ja hieman kalliimpi ratkaisu eli takaisinohjattu kytkentä, joka tuo omat haasteensa lihaksen säädön kanssa ja lihaksen anturoinnin kanssa. Antureita tarvittaisiin joko lineaariantureita mittaamaan lihaksen pituutta, jotka ovat hyvin kalliita. Anturit olisivat tiellä ja alttiita kolhuille. Toinen anturointi tapa olisi paineantureiden käyttö. Tässä taas haasteena on antureiden riittävä nopeus ja antureiden saanti lihaksen sisälle. Venttiileinä voitaisiin käyttää on/off –venttiileitä, jotka ovat edullisia ja nopeita.

Toinen vaihtoehto on valita paineilma proportionaaliventtiili. Tämän etuna olisi syöttää ainoastaan haluttu painetaso, ja venttiili säätäisi halutun painetason itse. Proportionaaliventtiilit kuitenkin ovat huomattavasti kalliimpia kuin on/off –venttiilit, mutta anturointia ei tarvita. Proportionaaliventtiilit ovat myös huomattavasti hitaampia kuin on/off –venttiilit. Haasteena on ohjauksen tekeminen, koska toimilaitteet eivät ole lineaarisia. Ohjaus jouduttaisiin tekemään ainoastaan painetta syöttämällä ja sillä hallita sekä pituutta ja kuormaa.

Valitaan paineproportionaaliventtiilin. Syynä on kokonaishinta ja ulkonäkökysymykset. Liikealusta on kuitenkin jatkuvasti esillä ja sitä käytetään virtuaaliympäristöissä, jolloin ylimääraisten johtojen ja muiden esillä olo saattaa häiritä varsinaista käyttöä. Proportionaaliventtiiliksi valittiin Feston valmistama venttiili malliltaan VPPM-6L-L-1-G18-0L6H-V1N. Kyseinen laite tuli valituksi, koska se ohjaa juuri 0-6 bar:iin painetta, joka on vastaava kuin toimilaitteilla. Lisäksi tärkeä ominaisuus on, että se oli markkinoiden nopein, vasteaika on 150 ms. Kuvassa 3.16 on esitetty valittu proportionaaliventtiili.



Kuva 3.16 Valittu paineproportionaaliventtiili.

Lisäksi se kykeni 900 l/min virtaukseen, joka on riittävästi. Tilavuus virta on erittäin tärkeä lihaksen täyttymisen takia. Näin saadaan mahdollisimman nopea liike toteutettua.

Proportionaaliventtiilin liitännät on G1/8 kierteellä. Liityntöjä on paineilman tulo, toimilaitteelle ja poisto. Venttiiliä ohjataan 0-10 V jännitteellä ja käyttöjännitteenä on 24 V.

Venttiilit sijoitetaan mahdollisimman lähelle toimilaitetta, jotta letkun pituus toimilaitteelle olisi mahdollisimman lyhyt. Tämä siksi, että tilavuus minimoitaisiin venttiilin jälkeen, koska kaikki ylimääräinen tilavuus pitää ottaa pois, jotta liike olisi mahdollisimman nopea. Tilavuuden kasvattaminen hidastaa liikkeen nopeutta. Venttiileille tehdään kiinnityslevy perusosan tolppiin. Jokaiseen tolppaan tulee kaksi venttiiliä eli jokaiselle lihakselle oma. Levy tulee alareunastaan 600 mm korkeuteen.

3.5.2. Pneumatiikkaletkujen ja suodattimen valinta

Paineilmaverkon liitin on virtuaalilaboratoriossa noin 4 m:n päässä laitteesta. Linjassa on sulkuventtiili, jossa on 1" kierrelaitin. Jotta tilavuusvirta olisi mahdollisimman suuri laitteelle asti, valittiin letkuksi 25 mm:n sisähalkaisijaltaan oleva letku, joka on tarkoitettu tuuman liittimille. Letkun paineenkesto on 15 bar:iin asti. Letkuun voi asentaa myös kokonsa ansiosta hyvin 1" kierrelaitin. Paineilmaverkko tarvitsee myös suodattimen pienten lika hiukkasten takia.[Askon pneumatiikka kirja]. Suodattimeksi valittiin NEW DEAL-33-FA-16. Tärkeimpinä ominaisuuksina valintaperusteeseen on suodatuskyky, joka on 20 μ . Maksimi käyttöpaine on 18 bar ja

tilavuusvirtaa kykenee menemään läpi 9100 l/min. Suodattimessa on myös 1 ” kierreliityntä, tämä helpottaa suodattimen liittämistä letkuun. Letku haaroitetaan jokaiselle tolपालle, eli kahdelle venttiilille tulee yksi letku. Venttiilille saapuvan ilmanmäärän pitää olla riittävä ja kyseinen ratkaisu ei rajoita ilman pääsyä venttiilille. Venttiililtä toimilaitteelle valittiin 8 mm letku ja liittimet. Näin tilavuus ei kasva liian isoksi toimilaitteen puolella, mutta tilavuusvirtaa ei rajoita letkun halkaisija.

Lihaksen tyhjetessä ilma poistuu samaa 8 mm letkua venttiilille. Venttiilissä on poistolinjalle varattu myös G1/8 kierteellä oleva reikä. Jotta tyhjeneminen tapahtuisi mahdollisimman nopeasti, ilman pitäisi päästä isoon tilavuuteen mahdollisimman nopeasti. Ilmaa ei voi päästää suoraan huoneeseen, koska siitä tulisi aivan liian kova ääni. Äänenvaimennin taas hidastaisi lihaksen tyhjenemistä liikaa. Jotta voidaan ohjata ilman isoon letkuun, ilman suuria vastuksia, joudutaan venttiiliin rakentamaan diffuusori. Diffuusori vähentää vastusta, joka johtuu ilman pyörteistä seinämässä, jolloin ilman kulkeva käytävä suurenee. Diffusoorin toiseen päähän tehdään G1/8 kiertet ja koverretaan suppilomainen käytävä, joka laajenee. Diffusoorin toiseen päähän tulee liitin sisähalkaisijaltaan 18 mm letkua varten. Tämä letku on tarpeeksi suuri, jotta isoja vastuksia ei ole. Liitoksen ei tarvitse olla tiukka, kunhan letku pysyy siinä. Ilma ei ole paineistettua enää, joten letkun ei tarvitse olla paineen kestävä. Letkut johdetaan virtuaalilaboratoriossa lattiassa oleviin reikiin, jotka johtava alla olevaan varastohuoneeseen. Näin suhahtelu äänet eivät kuulu ja poistumisreitinkin on vähä vastuksinen.

3.6. Liikealustan ohjaus

Liikealustan ohjaus tapahtuu paineproportionaaliventtiilien kautta. Venttiilejä ohjataan säätämällä jännitettä 0-10 V. Näin saadaan asetettua haluttu painetaso toimilaitteen sisälle. Toimilaite on epälineaarinen ja sen pituus riippuu kuorman suuruudesta ja paineen suuruudesta, siksi toimilaitetta on erittäin haastavaa ohjata pelkällä paineohjauksella. Liikealustan ohjaus siis tapahtuu avoimella ohjauksella.

Proportionaaliventtiilejä ohjataan tietokoneelta I/O-kortilla. Tietokoneessa on Linux-käyttöjärjestelmä ja liikealustaa varten ohjelmoidaan oma ohjelma laskemaan oikea paine toimilaitteille. Ohjelmassa käytetään hyväksi matemaattista mallia ja kolmannenasteen polynomifunktiota. Lisäksi se muuntaa vielä paineen oikeaksi jännitteeksi. Linux-käyttöjärjestelmä on valittu sen vakauden ja nopeuden vuoksi.

Toro-simulaattorissa dynamiikkaratkaisija laskee virtuaalimaailmassa tapahtuvat kiihtyvyydet ja muut fysikaaliset ominaisuudet. Toro-simulaattorin dynamiikka ratkaisija lähettää suoraan paikka- ja orientaatiotiedot liikealustanohjauksen ohjelmalle. Pistettä, josta dynamiikkaratkaisija laskee kiihtyvyydet ja kallistukset, ei ollut tarkkaa koordinaattipistettä selvillä. Dynamiikkaratkaisija ilmoitti pisteen olevan vain keskellä

ohjaamaa. Liikealusta ohjaa virtuaalimaailmassa olevan hytin lattialla olevaa tiettyä pistettä. Dynamiikkaratkaisijalta tulevaan ohjauspisteen ohjaukseen piti vielä tehdä koordinaatisto muutos käsittely, jotta se vastaisi liikealustan ohjauspistettä.

Liikkuva osa nousee alkutilaan päälle laitettaessa, jotta se kykenisi tuottamaan tarvittavia liikkeitä. Liikealustan alkutila on puolella välissä z-suuntaista translaatioliikettä. Näin se pystyy toteuttamaan parhaiten liikkeitä kaikkiin mahdollisiin suuntiin.

3.7. Viimeistely liikealustalle

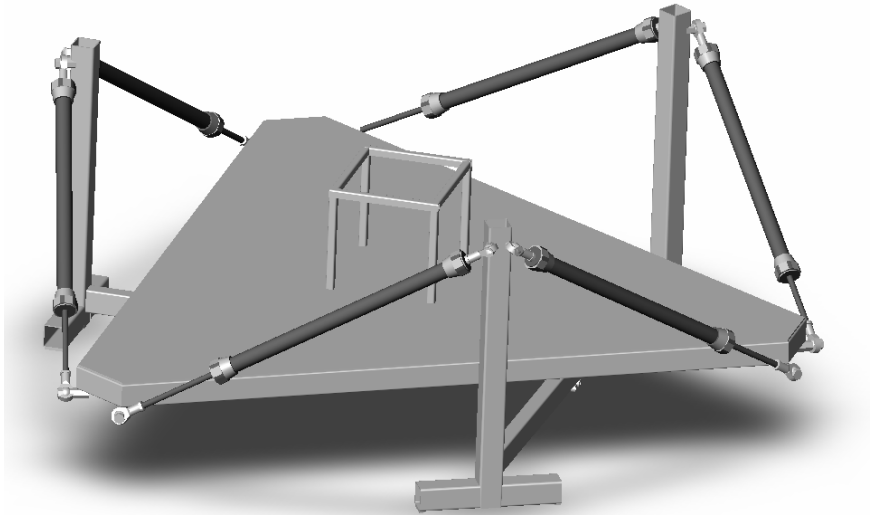
Jotta liikealusta olisi valmis Toro-simulaattorille, pitää siihen tehdä vielä tehdä muutamia lisäyksiä. Liikkuvanosan päälle tulee vanerilevy (paksuus 18mm), jota pitkin voi kävellä liikealustan penkille. Penkin etupuolelle vaneriin kiinnitetään kaasupoljin ja jarrupolkimet. Polkimet sijoitetaan vastaavaan paikkaan kuin oikeassa Torossa. Kaasupoljin on normaali sähköllä toimiva ja liikealustaan asennetaan vastaava poljin. Toron jarrupoljin on oikeasti hydraulinen, joten tähän simulaattoriin joudutaan asentamaan sen tilalle vastaavanlainen sähköpoljin kuin kaasupoljinkin on. Polkimet liitetään I/O-korttiin, joka lukee kuinka paljon kaasua tai jarrua painetaan. Polkimet toimivat säädettävän vastuksen tavoin. Polkimeen syötetään tietty jännite, joka palautuu jännitteenä, jonka suuruus riippuu, paljonko pedaalia painetaan.

Toron penkissä on kaksi tikkuohjainta, joilla ohjataan Toron nivelen kääntymistä, vaihteita, suuntaa ja kauhan toimintaa. Tikkuohjaimet kiinnitetään myös I/O-korttiin, josta luetaan kulloinkin tapahtuva toiminto. Tikkuohjainten kallistukset toimivat samalla periaatteella kuin pedaalitkin. Ja nappulat toimivat kytkiminä Eli, kun nappia painetaan, jännite nousee ja kortilta voidaan lukea, että nappulaa painettiin. Toron kontrollointia varten joudutaan tekemään oma ohjelma. Tämä toimii myös Linux-käyttöjärjestelmässä. Ohjelma lukee I/O-kortilta tietoja mitä käyttäjä kulloinkin haluaa ohjata ja lähettää tiedot eteenpäin dynamiikkaratkaisijalle.

3.8. Valmis liikealusta

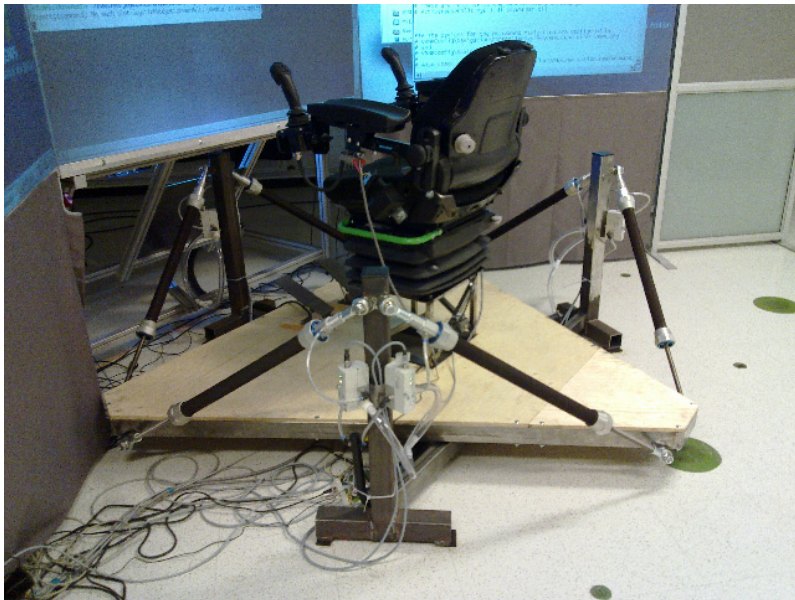
Liikealustan suunnittelussa vaatimuksista ei tarvinnut kompromisseja. Tärkein ominaisuus, että liikealusta on kevyt ja liikuteltava, toteutui. Liikealusta mahtuu hyvin TTY:n virtuaalitilaan ja voidaan käyttää myös Seinäjoen virtuaalitilassa. Liikealusta mahtuu hyvin pakettiautoon purettuna. Liikealustan valmistaminen onnistuu yhdeltä henkilöltä helposti. Liikealustasta on todella edullinen, ainoa kallis osa on venttiilit. Liikealusta on erittäin turvallinen kallistuksen suhteen ja painopiste voi hyvinkin paljon sivussa. Liikealustalle voi, jopa kiivetä sen ollessa käytössä. Kyytiin mahtuu hyvin

Toron penkki ja toimintalaitteet. Liikealusta kykenee kantamaan myös isoja kuormia. Kuvassa 3.17 on valmis liikealusta CAD-mallina ja kuvassa 3.18 valmis laite laboratoriossa.



Kuva 3.17 CAD-mallina valmis liikealusta.

Kuvassa 3.19 nähdään liikealusta käytössä Toro-simulaattorissa. Taustalla näkyy virtuaalitalan kolme näyttöpintaa. Kuva näyttöpinnoille on piirretty kuljettajan perspektiivistä Toron hytistä.



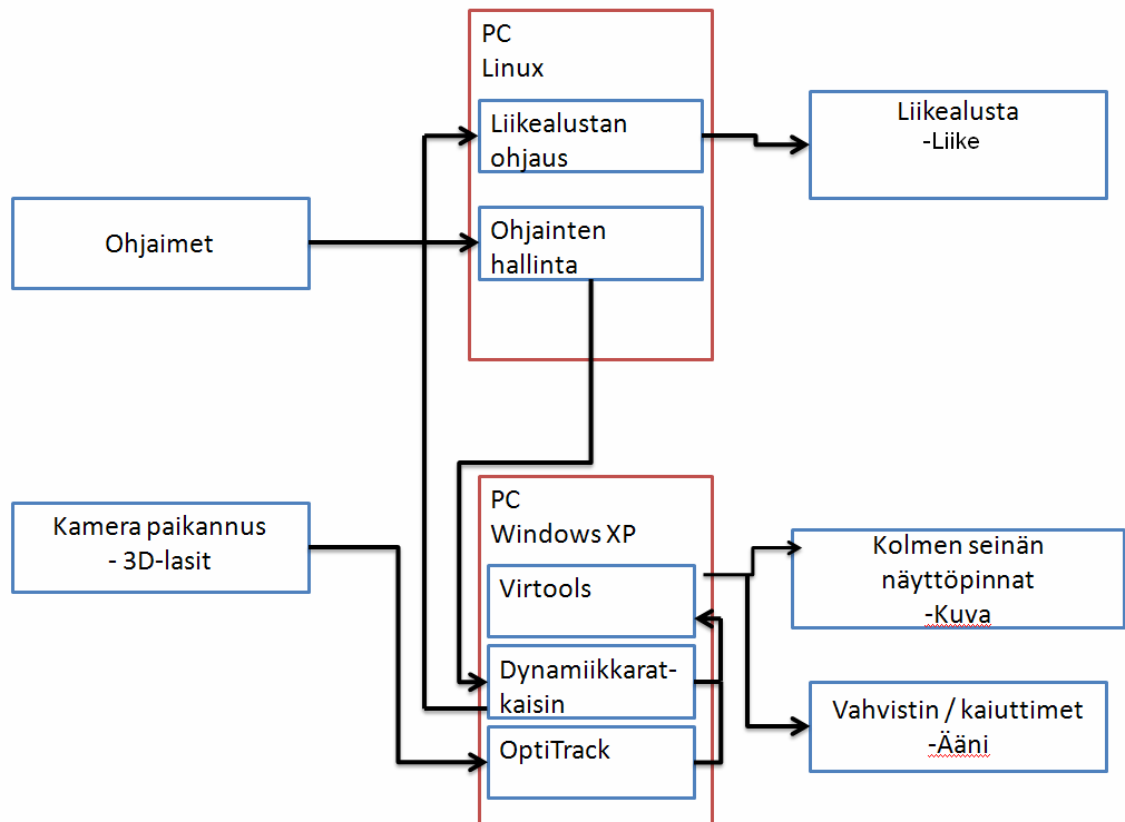
Kuva 3.18 Valmis liikealusta virtuaali laboratoriossa.



Kuva 3.19 Liikealusta käytössä Toro-simulaattorissa.

Toivomuksista jouduttiin hieman tinkimään kallistuksien suhteen. Hiljaisen laitteen suunnittelu onnistui diffuusorin ja paineilman johtamisen alakerrokseen ansiosta. Liikealusta ei tule näyttöpintojen eteen. Liikkeitä voidaan tuottaa kaikkiin kuuteen vapausasteen suuntaan.

Liikealustan suunnittelussa onnistuttiin erittäin hyvin, jos verrataan vaatimus- ja toivomuslistaa. Jotta liikealustan sopivuutta liikkuvantyönkoneen simulaattori käyttöön ja varsinkin Sandvikin Toro:n simulointiin voidaan arvioida pitää liikealustalle tehdä kiihtyvyyksmittaukset ja käytettävyydesti oikeilla kuljettajilla. Kiihtyvyyksmittauksissa myös toivomuslistan lyhyt vasteaika selviää.



Kuva 3.20 Kaaviokuva laitteistoin kytkennästä.

Kuvassa 3.20 nähdään koko laitteiston kytkennät toisiinsa. Valmiissa kokonaisuudessa on alkuperäiset näyttöpinnat, äänet, paikannus ja Virtools ohjelma. Laitteistossa on kaksi tietokonetta, toinen on Linux-käyttöjärjestelmällä, joka ohjaa liikealustaa ja ohjainten hallintaa. Toinen on Windows-käyttöjärjestelmällä, joka hoitaa visualisoinnin, dynamiikkaratkaisemisen ja paikannuksen.

4. LIIKEALUSTAN MITTAUKSET

Liikealustan toimivuutta testattiin kahdella eri testillä. Ensimmäinen testi oli käytettävyydesti, jossa kuljettajina toimi Sandvikin omia kuljettajia. Tarkoituksena oli saada tietoa, lähinnä sanallista, kuinka hyvin liikealusta soveltuisi Toro-simulaattorin käyttöön. Toisessa testissä tehtiin kiihtyvyyssmittauksia. Kiihtyvyyssmittauksessa mitattiin kaikki mahdolliset vapausasteet. Kiihtyvyyssmittauksissa liikealusta oli irrotettu dynamiikkaratkaisijasta ja ohjaussignaali generoitiin itse.

4.1. Käytettävyydesti

Käytettävyydestissä oli tarkoituksena ajaa virtuaalista kaivoslastaria, Toroa. Laitteella oli tarkoitus ajaa sama testisekvenssiä useampaan kertaan, niin että kytkettiin tiettyjä ominaisuuksia päälle ja pois. Kytkettyjä ominaisuuksia oli liikealusta, stereo näkymä, päänpaikannus. Testisekvenssi oli yksinkertaisesti ajaa kivikasalalle, lastata kauha, ajaa kippauspaikalle ja tyhjentää kauha. Lisäksi testissä tarkkailtiin törmäilyjen määrää ja kestoa. Kuljettajiksi tuli yhteensä viisi kappaletta Sandvikin omaa henkilökuntaa, joilla on ajokokemusta kyseistä laitteesta. Kaksi kuljettajaa oli Sandvik Automation puolelta, eli he olivat tottuneet etäohjaamaan laitteita. Muut kolme kuljettajaa olivat Toron kanssa muuten tekemisissä päivittäin. Laitteen käyttömäärä huomioitiin myös testissä. Tämän työn ohessa kiinnitetään huomiota ainoastaan kuljettajien antamaan suulliseen palautteeseen, jota he antoivat ajon aikana sekä ajojen jälkeen.

Kuljettajien kommentteista päällimmäisenä tietoon tuli, että liikealusta oli hyvä. Liikealusta kuitenkin joidenkin mielestä teki ylimääräisiä liikkeitä ja liikealusta tuntui liian löysältä. Kuljettajat kuitenkin ajavat työkoneita hyvin paljon istuintuntuman avulla. Kuljettajat myös tuntevat sitä kautta myös mitä milloinkin koneessa tapahtuu. Liikealustan löysyys on helposti nähtävissä toimilaitteiden joustavuutena, kun painopiste muuttuu, myös kuormitus muuttuu lihaksilla ja näin lihaksien pituus muuttuu. Liikealusta ei ole koskaan täydellisen jäykkä. Ylimääräisten liikkeiden selvittäminen on vaikeampaa, koska paikka tieto tulee suoraan dynamiikka ratkaisijalta. Sen sisäisiin ohjaussignaalin suodatusta koskeviin asioihin on hyvin vaikea ottaa kantaa. Miten pitkät kiihtyvyydet toteutetaan liikealustalle, kallistetaanko esimerkiksi liikealustaa näissä tilanteissa. Ongelman oli myös, ettei tiedetty tarkalleen pistettä, josta dynamiikkaratkaisija laskee kiihtyvyyden, joten jotkin liikkeet saattavat olla hieman vääriä. Yhtenä syynä voi myös olla liikealustan tekemä viive liikkeisiin, joka on melko suuri.

Molemmat etäohjauskuljettajat pitivät liikealustaa erittäin hyvänä. Tähän syynä saattaa olla heidän vähäinen ajokokemus oikeassa maastossa laitteelta. He ajavat laitetta suurimman osan ajasta kuitenkin toimistosta paikallaan pysyvistä penkistä.

Kuljettajien kommenteista kuitenkin näkyi liikealustan tarpeellisuus virtuaaliympäristöissä ja kuljettajat puhuivat testin aikana laitteesta, eikä virtuaalimalleista.

4.2. Kiihtyvyyssmittaukset

Kiihtyvyyssmittausten tarkoituksena oli saada absoluuttista tietoa kiihtyvyyksistä ja liikealustan nopeudesta. Kiihtyvyyksiä mitattiin kolmiakselisella kiihtyvyyssanturilla ja kahdella kaksiakselisella kulmanopeusanturilla eli gyroilla. Näin saatiin mittaustietoa kaikissa vapausasteissa. Mittausten aikana liikealustalla penkissä istui testihenkilö, painoltaan 100 kg.

4.2.1. Mittauslaitteisto

Kiihtyvyyssanturi oli ± 4 g:n anturi. Kulmanopeuden mittauksessa käytettiin herkkyydeltään 300 °/s antureita. Anturit kiinnitettiin liikealustaan jäykästi. Anturit kiinnitettiin tietokoneen I/O-korttiin josta anturin antamat jännitearvot luettiin.

4.2.2. Mittaus kohteet

Mittauksessa mitattaisiin liikealustan toimintaa eri tilanteissa, kuitenkin ilman dynamiikkaratkaisijaa. Tarkoituksena oli saada tietoa liikealustan viiveestä ohjaussignaaliin. Tämä voitaisiin mitata step-ohjauksen avulla. Step-ohjauksessa annetaan haluttu ohjausarvo ja katsotaan, koska liikealustan on saavuttanut arvon. Mittauksella katsottaisiin koska liikealusta saavuttaa halutun asennon. Mittaukseen tarvitsee lisäksi mitata ohjaussignaali ja synkronoida se mittausdatan kanssa. Siksi mittaamiseen valittiin tietokone, joka ohjaa liikealustaa. Näin signaalien synkronointi onnistuu helposti. Toisena mittaushoiteena on liikealustan seuraavuus syötettyä signaalia kohtaan. Tähän mittaukseen tehdään sinimuotoinen ohjaussignaali, jonka taajuutta vaihdellaan. Näin saadaan liikealustan rajataajuus selville. Mittauksia tehdään sekä translaatioliikkeitä sekä kallistuksille.

Kallistusmittaukset tehdään X- ja Z-akselin ympäri. Sini-muotoisen ohjaussignaalin taajuus alkaa 0,2 Hz ja jatkuu aina 2 Hz asti, 0,2 Hz välein. Taajuutta vaihdetaan aina kahden kokonaisen jakson eli kallistuksen jälkeen. Suurin kulma mittauksessa on $\pm 8^\circ$. Pienin kulma on $\pm 1^\circ$. Mittaus tapahtuu asteen välein. Step-

signaalin mittausta kallistuksille toteutetaan $\pm 5^\circ$ kulmille. Mittaus toteutetaan liikealustan ollessa alkutilanteessa ja sitten syötetään 5° kulma. Pidetään sekunnin ajan kyseisessä kulmassa, kunnes syötetään takaisin 0° kulmaan perusasentoon. Pidetään taas sekunnin verran paikallaan ja syötetään -5° ohjaussignaali, ja sekunnin päästä perustilaan. Sekunnin tauot pidetään, jotta liikealusta pääsee tavoite kulmaan ja on hetken paikallaan.

Translaatiomittaukset tehdään Y-akselin suhteen. Tämä valittiin mielenkiintoisimmaksi mittauskohteeksi, koska silloin kaikki toimilaitteet joko täyttyvät tai tyhjenevät, riippuen suunnasta. Step-mittauksessa perusasennosta liikealustaa liikutetaan ± 12 cm Y-akselin suhteen, eli ylös ja alas. Tässäkin testissä ohjataan ensiksi 12 cm alas ja odotetaan sekunnin verran ja ohjataan takaisin perusasentoon. Tämän jälkeen sama toistetaan 12 cm ylöspäin. Seuraavuus mittauksella eli sini-ohjauksella toteutetussa mittauksessa liikealustaa liikutetaan ylös ja alas eri taajuuksilla ja eri amplitudeilla. Taajuudet olivat samat kuin kulmamittauksessa eli 0,2 Hz:stä aina 2 Hz asti, 0,2 Hz välein. Ja taajuutta vaihdettiin myös kahden kokonaisen jakson jälkeen. Amplitudi eli liikealustan liikkuma matka oli ± 1 -8 cm. Mittaukset suoritettiin 1 cm välein.

4.2.3. Mittausdatan käsittely

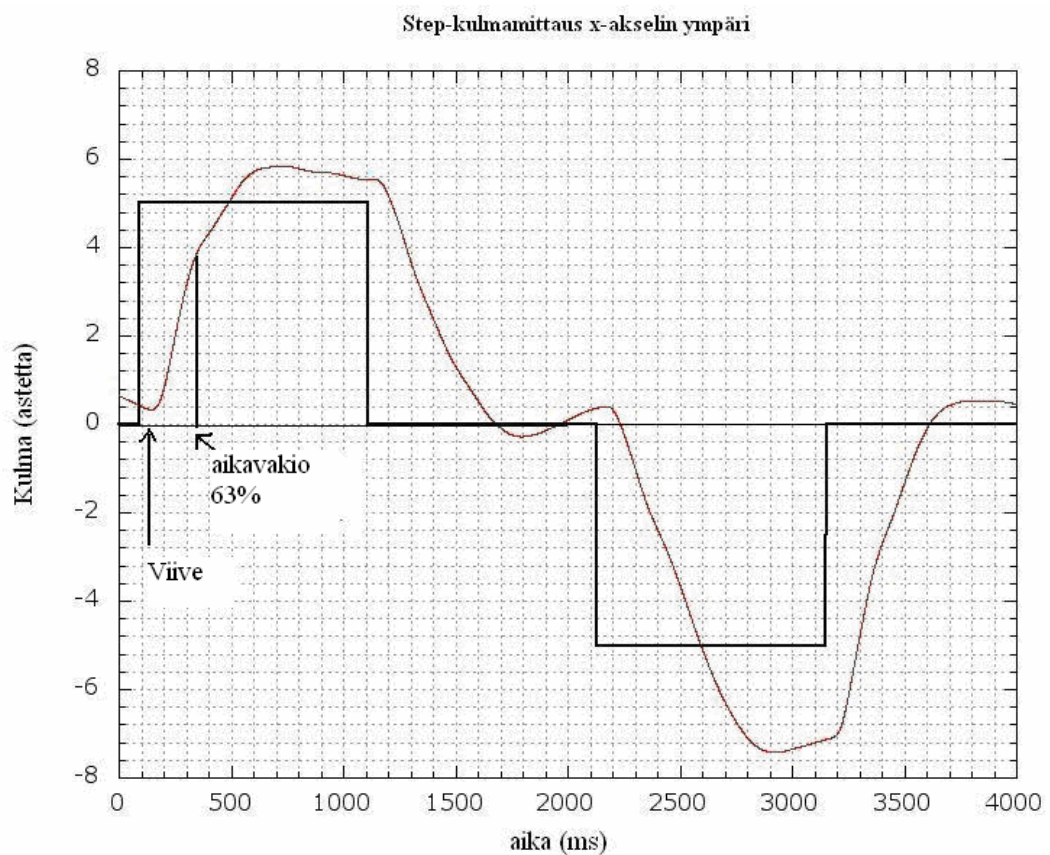
Mittausdatan syöttösignaaleina eli liikealustan kulmien ohjaukseen asteita ja translaatio ohjaukseen syötettiin metreitä. Mittauksissa käytettyjen anturien takia, mittauksien tulokset ovat kiihtyvyyttä kuvaavaa g-yksikköä tai kulmanopeutta eli astetta per sekunti. Tästä syystä mittausdataa pitää käsitellä, jotta voidaan piirtää kuvaajat samaan koordinaatistoon. Tästä syystä jotakin mittausdataa pitää integroida tai derivoida, riippuen mitä halutaan. Tämä aina vääristää hiukan mitattua dataa, johtuen mittausdatan kohinasta. Kohina aiheuttaa integroinnissa ja derivoinnissa kumuloituvaa virhettä ja virhe jää pieneksi mittauksen aloituksen jälkeen pieneksi, mutta kasvaa mitä kauemmas käyrällä mennään.

Tämän työn liitteenä ovat mittauksen kaikkien mittauksen tulokset piirrettynä koordinaatistoon. Koordinaatistoon piirretty musta signaali on aina ohjaussignaali ja värillinen signaali on mitattua signaalia. Kuvissa aika on aina vaaka-akselilla. Seuraavaksi kerrotaan mitä mitatuille signaaleille on tehty. Kulmaseurausmittauksissa ohjaussignaali on muutettu kulmanopeudeksi, jotta alkuperäinen mittaus-signaali säilyisi ennallaan. Kulman step-mittauksessa kulmanopeus-data on jätetty sellaiseksi, mutta samaan kuvaan on piirretty ohjaussignaali asteissa. Tämä selventää, milloin liikealusta on saanut komennon liikkua. Lisäksi on piirretty samasta tilanteesta aika-kulma koordinaatisto. Tässä koordinaatistossa mitattu signaali on jouduttu derivoimaan, jotta nähdään hetkellinen kulma. Translaatioliike Z-akselin suhteen on piirretty suoraan aika-kiihtyvyysskoordinaatistoon eli ohjaussignaali on jouduttu integroimaan kahteen kertaan.

Translaation step-mittauksessa on myös piirretty kaksi kuvaajaa. Toinen on aika-kiihtyvyys koordinaatistossa ja toinen aika-matka koordinaatistossa. Kummassakin on ohjaussignaali piirretty matkana.

4.2.4. Mittauksen tulokset

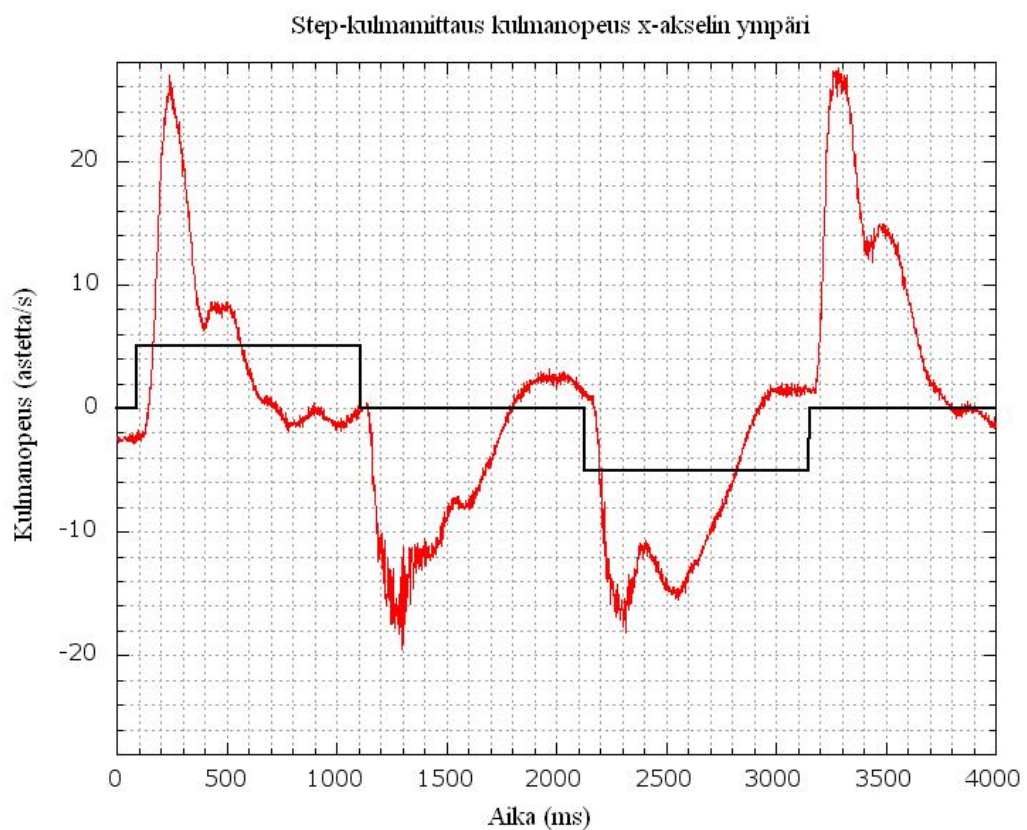
Mittauksia oli hyvin monta, joten kaikkien mittausten kuvaajaa ei kannata esitellä erikseen. Esimerkki tapauksina on kulman step-ohjauksen mittauksesta X- ja Z-akselin ympäri. Sini-ohjauksen seuranta ovat myös X- ja Z-akselin ympäri neljän asteen kallistukset eri taajuuksilla. Translaatiosta on otettu step-ohjauksella toteutettu Z-akselin suhteen mittaus.



Kuva 4.1 Mittaustulos X-akselin ympäri step-ohjauksella $\pm 5^\circ$ kallistus.

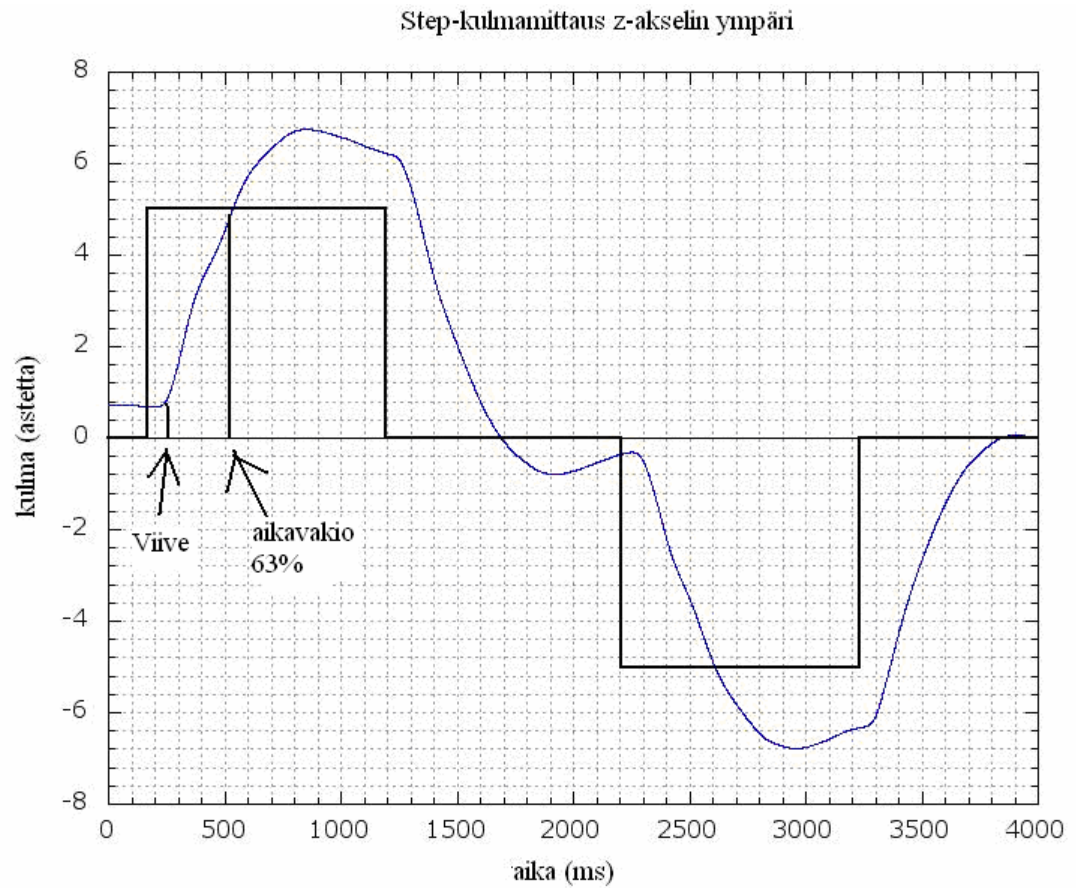
Kuvassa 4.1 nähdään step-ohjauksella tehty mittaus X-akselin ympäri. Mustalla on piirretty ohjaussignaali ja punaisella mitattu arvo. Vaaka-akselina on aika millisekunneissa ja pystyakselilla kulma asteina. Kuvaajaan on merkitty reagoinnin viive. Reagointiviive on aika, joka on kulunut signaalin lähdettyä ja päättyy siihen kun laite alkaa reagoida. Reagointiviive tässä tapauksessa on noin 60-80 ms. Kuvaajaan on myös laitettu 63 %:n kohta kokonaisviiveestä. Kokonaisviive on aika, kun laite on saavuttanut tavoite arvonsa signaalin antamisesta. 63 %:n reagointi on noin 200-250 ms luokkaa. Kokonaisviive on noin 400 ms luokkaa. Maksimivirhe X-akselin ympäri on

noin $2,5^\circ$. Kuvassa toinen näkyvä -5° kallistuksen mitattu käyrä ei osu aivan kohdalleen ja tämä johtuu juuri mittauksen integroinnista. Kuvassa 4.2 nähdään vastaava mittaus kuin 4.1, mutta raakadatana. Musta käyrä on ohjaussignaali, joka kuvaa asteina liikkuvan alustan tilaa, tämä on asteina, jolloin se helpottaa hahmottamaan tilannetta ja kohtaa jolloin ohjauksessa tapahtuu muutoksia. Integroituna kulma olisi signaalin anto kohtana vain pystysuoraviiva. Pystyakselin punaiselle mitatulle käyrälle on kulmanopeus astetta/s. Kuvaajasta nähdään, että liikealusta palautuu samaan paikkaan kuin alkutilanteessa, joten tämäkin tukee kuvan 4.1 integrointi ongelmaa. Kuvasta nähdään, että liikealustan kulmanopeus on noin $\pm 20\%$. Liikkuvan työkonteen tuottama kulmanopeus on noin $\pm 15\%$ [21].

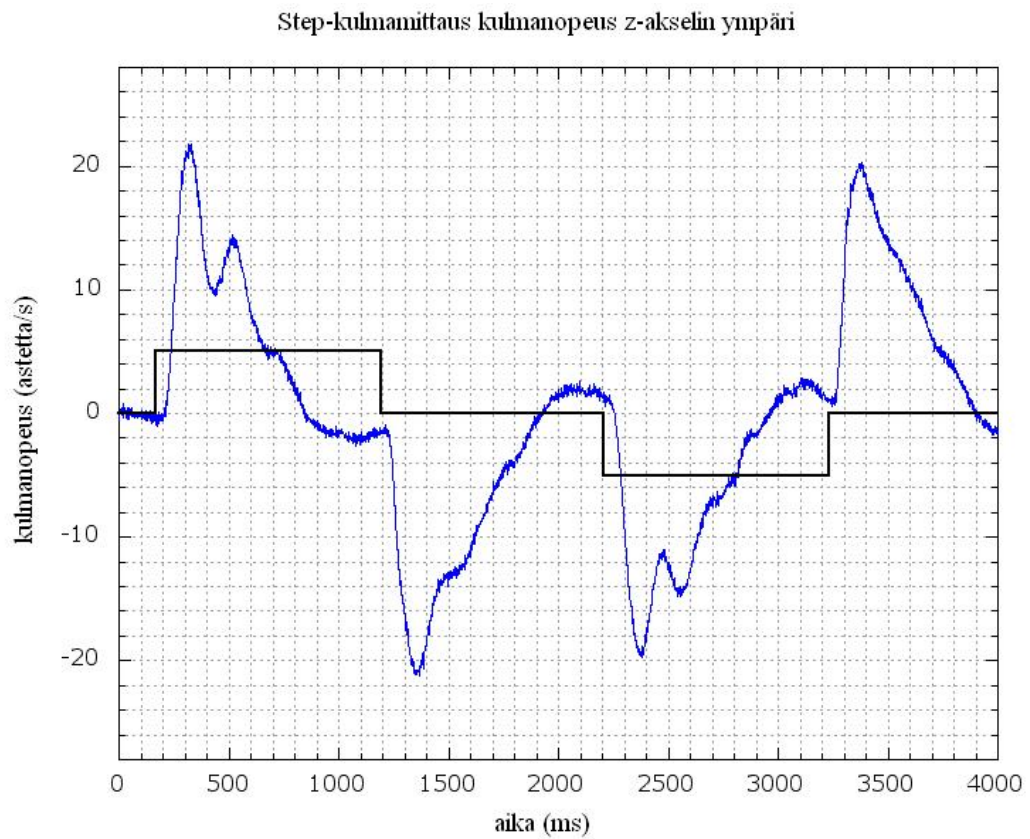


Kuva 4.2 Mittaus X-akselin ympäri step-ohjauksella $\pm 5^\circ$ kallistuksella raakadatana.

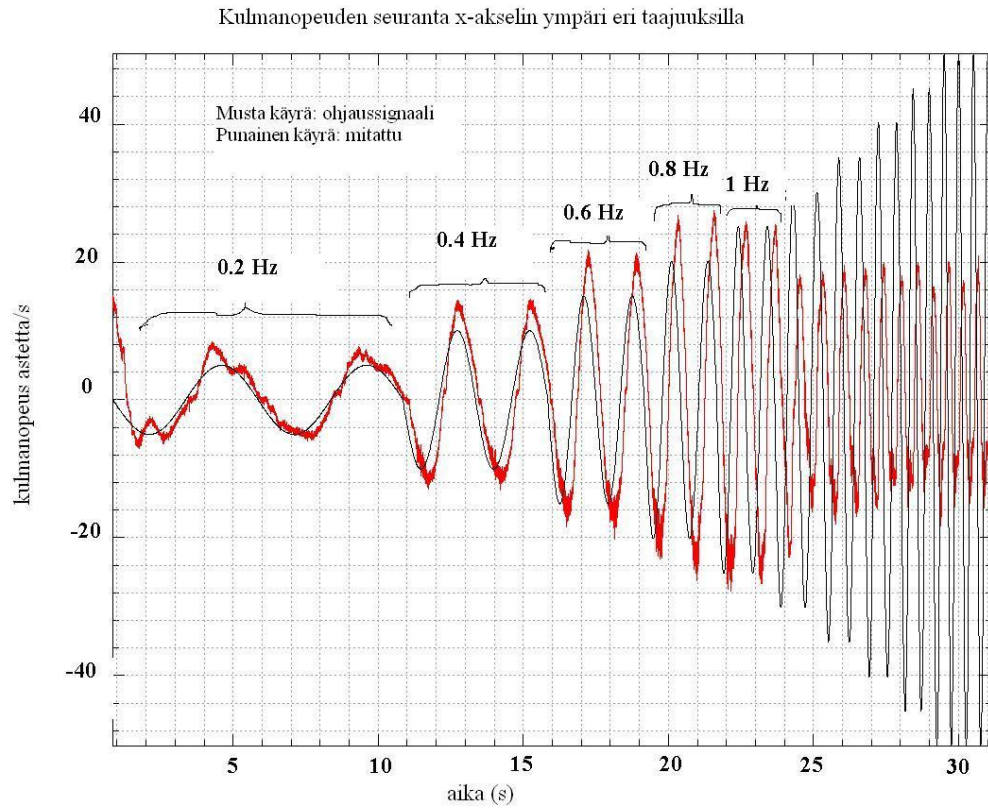
Kuvissa 4.3 ja 4.3 nähdään vastaavat mittaukset Z-akselin ympäri. Kuvista nähdään vastaavat asiat kuin X-akselin ympäri piirretyistä kuvaajista. Z-akselin ympäri tehty step-kulmamittauksen viive on noin 60-80 ms. 63 %:n viive on 300 ms ja kokonaisviive on 450-500 ms. Maksimivirhe on noin $1,75^\circ$.



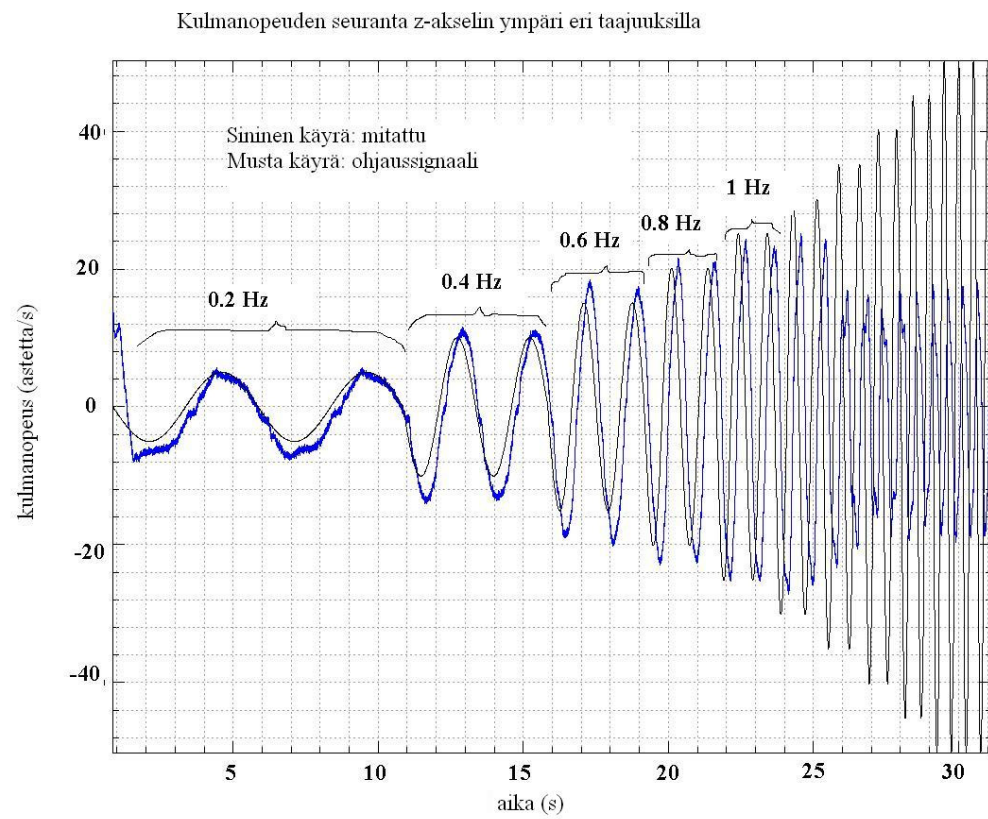
Kuva 4.3 Mittaustulos Z-akselin ympäri step-ohjauksella $\pm 5^\circ$ kallistus.



Kuva 4.4 Mittaus Z-akselin ympäri step-ohjauksella $\pm 5^\circ$ kallistuksella raakadatana.

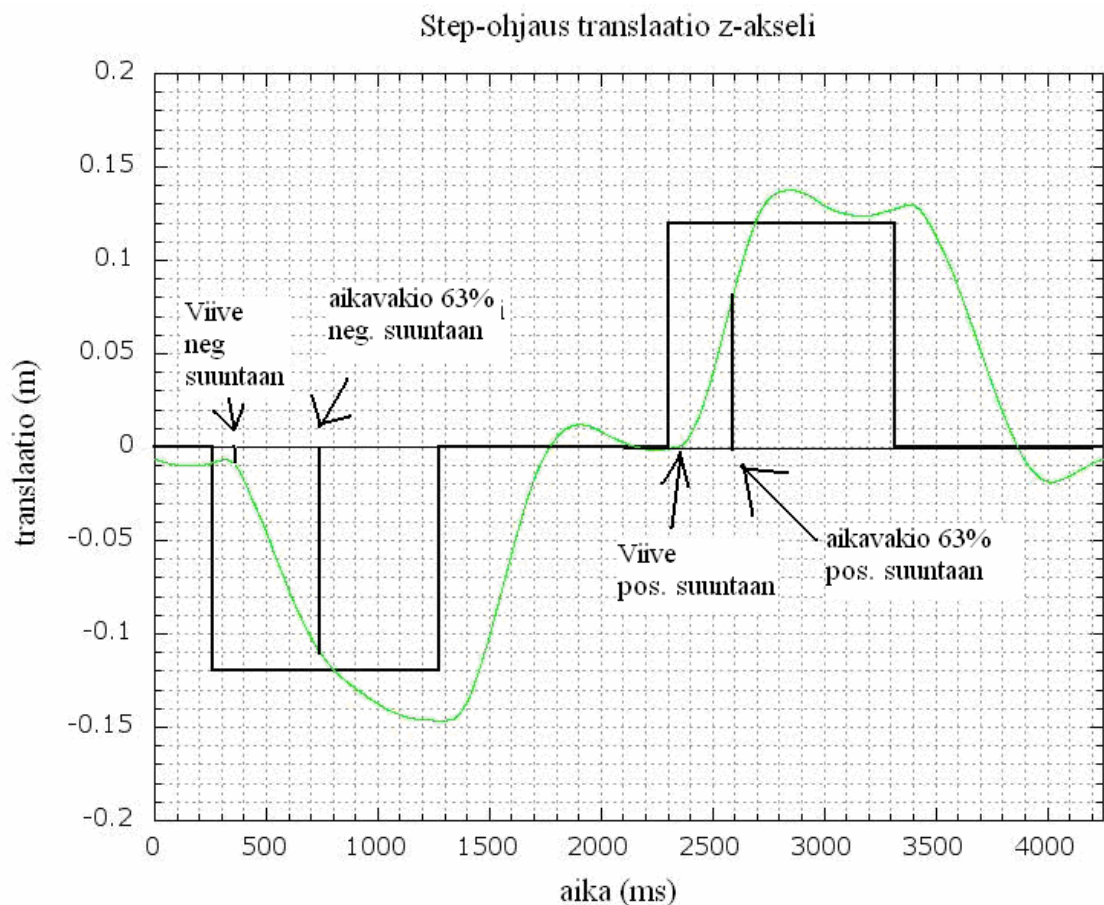


Kuva 4.5 Kulmanseuranta mittaus $\pm 4^\circ$ kallistuksella X-akselin ympäri.



Kuva 4.6 Kulmanseuranta mittaus $\pm 4^\circ$ kallistuksella Z-akselin ympäri.

Kuvissa 4.5 ja 4.6 on esitetty mittaustulokset kulmanseuranta mittauksista. Kuvassa 4.5 on esitetty X-akselin ympäri ja kuvassa 4.6 on Z-akselin ympäri. Mustalla on piirretty ohjaussignaali, punaisella X-akselin ympäri ja sinisellä Z-akselin ympäri mitattu data. Kuvista nähdään liikealustan seuraavan hyvin sinimuotoista käyrää. Kuitenkin noin 1.0 Hz taajuuden kohdalla tulee vastaan rajataajuus. Kuvista nähdään, että liikealusta kykenee seuraamaan maksimissaan ± 20 °/s kulmanopeudella toteutettavia liikkeitä. Kuvaajien alussa mitattu käyrä ei seuraa ohjaussignaalia ja tämä johtuu siitä, että liikealusta käynnistetään lepotilasta mittaukseen, jolloin mittauksen alussa tapahtuu ylimääräistä tärähdystä. Maksimivirhe X-akselin ympäri mitattu on 7 °/s ja Z-akselin ympäri 4 °/s.

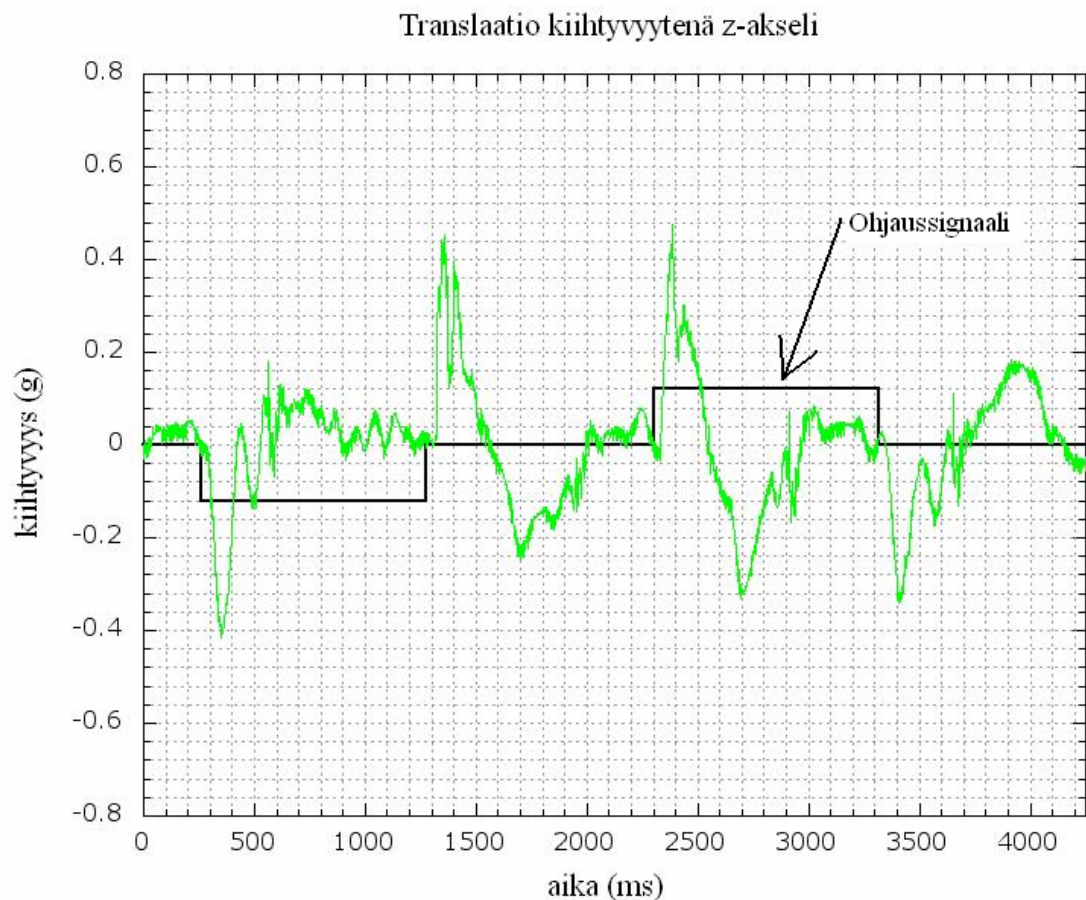


Kuva 4.7 Step-mittaus Z-akselia pitkin ± 0.12 m liikkeellä.

Kuvassa 4.7 on Z-akselin translaatio liikkeen step-mittaus. Ohjaussignaali on mustalla ja mitattu käyrä on vihreällä. Mittaus on derivoitu mitatusta datasta, jotta vertailu ohjaussignaaliin olisi helpompaa. Kuvasta nähdään, että reagointiaika on melko sama kuin kulman step-mittauksissakin 60-80 ms. Huomioitavaa on, että alaspäin suuntautuva liike on hieman hitaampi kuin ylöspäin. Alaspäin menevän liikkeen 63 %:n toteutuma kestää noin 400ms ja ylöspäin menevä liikkeen 63 %:n liike kestää vain noin 300 ms. Tämä johtuu lihaksen tyhjenemisen hitaudesta ja toimilaitteiden välisen kulman

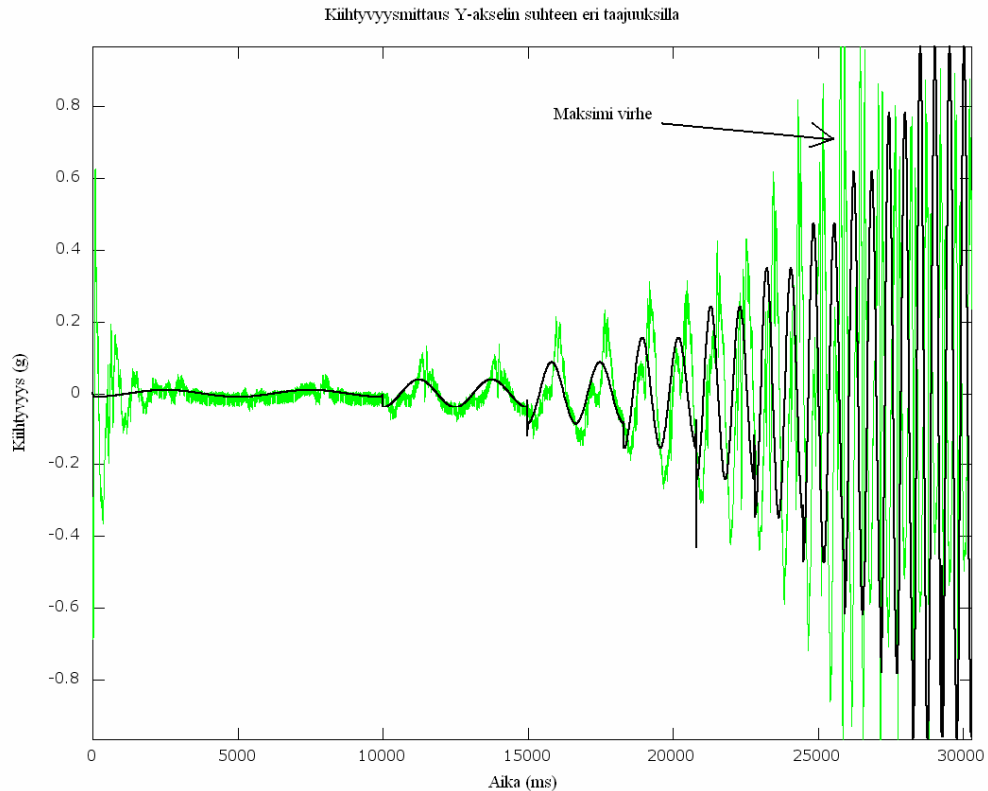
vaikutuksesta. Maksimivirhe negatiiviseen suuntaan on 0,025m ja positiiviseen suuntaan 0,015m.

Kuvassa 4.8 nähdään edellä mainitun mittauksen raakadata eli Z-akselin step-ohjauksen translaatio kiihtyvyyden kuvaajana. Tässä kuvassa ohjaussignaali on piirretty mustalla ja kiihtyvyysskäyrä vihreällä. Kuvasta nähdään liikealustan kykenevän tuottamaan noin $\pm 0,4$ g:n kiihtyvyyksiä pystysuoraan. Liikkuvan työkonen tuottaa 0,5 g:n kiihtyvyyksiä normaalissa työjaksokierroksessa[21]. Tulos on varsin lähellä oikean työkonen kiihtyvyyksiä.



Kuva 4.8 Step-mittaus Z-akselia pitkin ± 0.12 m liikkeellä raakadatana.

Kuvassa 4.9 on Y-akselin suhteen mitattu sinimuotoinen ohjaus eri taajuuksilla. Amplitudina on 6 cm. Mittausdata on piirretty vihreällä, ja se on käsittelemätöntä. Mustalla on piirretty ohjaussignaali, joka on jouduttu derivoimaan kaksi kertaa. Derivoinnista johtuen ohjaussignaali on epäjatkuvuuskohtia taajuuden vaihdon kohdalla. Mittauskäyrän alussa on virhettä, joka johtuu liikealustan päälle laittamisesta. Maksimivirhe on 0,4 g:tä 1,6 Hz:n kohdalla. Ja rajataajuus tulee 1,8 Hz:n kohdalla.



Kuva 4.9 Y-akselin sinimuotoinen ohjaussignaali eri taajuuksilla.

4.2.5. Mittauksen yhteenveto

Taulukkoon 4.1 on koottu yhteenvetona mittaustulokset. Viiveiden suuruus on suuruinen sama kaikissa step-mittauksissa. Viive kuvaa siis venttiilien ja ohjelmien tuottamaa viivettä. Viiveen jälkeen lihas alkaa täyttymään ja liike havaitaan mittauksissa. Poikkeavuutena tähän on translaation liike Y-akselia positiiviseen suuntaan. Viiveen ero on noin 10 ms, joten voidaan todeta, että viive ohjauksen signaalin alkamisesta on 60-80 ms:a.

Taulukko 4.1 Mittaustulosten yhteenveto

| | MITTAUS | | | | | | |
|------------------|------------|------------|---------|---------|-------------|------------|-------|
| | KULMA | | | | TRANSLAATIO | | |
| Mittauksen muoto | Step | | Sini | | Step | | Sini |
| Akseli | X | Z | X | Z | Neg. Y | Pos. Y | Y |
| Viive | 60-80 ms | 60-80 ms | | | 60-80 ms | 50-70 ms | |
| Aikavakio 63% | 220 ms | 300 ms | | | 450 ms | 300 ms | |
| Max. Virhe | 2,5 ° | 1,8 ° | 7,0 %/s | 4,0 %/s | 0,025 m | 0,015 m | 0,4 g |
| Kokonaisviive | 400-500 ms | 400-500 ms | | | 700-800 ms | 400-450 ms | |

Aikavakio 63 %:a vaihteli 220ms:sta 450 ms:iin. Kulmien mittauksessa aikavakio oli samaa luokkaa 220-300 ms:a. Translaatioliikkeessä alaspäin Y-akselin suhteen aikavakio oli 450 ms ja ylöspäin mentäessä 300 ms:a. Kokonaisviive oli myös suurin Y-akselin negatiiviseen suuntaan, 700-800 ms:a. Muissa liikkeissä kokonaisviive oli luokkaa 400-500 ms:a. Hitauden Y-akselin suhteen negatiiviseen suuntaan johtuu lihasten tyhjenemisen hitaudesta. Eli lihaksen tilavuutta pitäisi pienentää. Toinen asia mikä hidastaa on lihasten asennuskulma. Mitä alemmas liikkuva osa tulee sitä enemmän lihaksien pitää pidentyä.

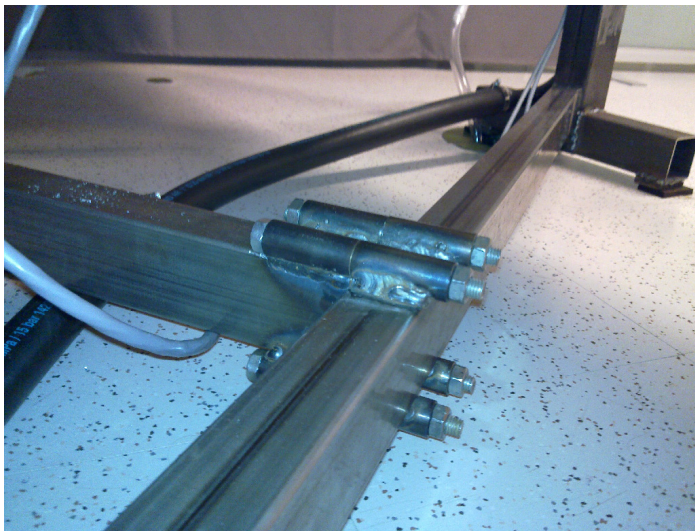
Maksimivirheet olivat step-mittauksessa suuria. X-akselin ympäri mitattu maksimivirhe oli $2,5^\circ$ ja tavoite arvo oli 5° , joten virhettä oli 50 %. Z-akselin suhteen prosenttuaalinen virhe oli 35 % luokkaa. Translaation step-mittauksessa liikkeen suuruus oli ± 0.12 m. Maksimivirhe negatiiviseen suuntaan oli 0.025m eli noin 21 % ja positiiviseen suuntaan 0.015 m eli 12,5 %. Virheiden suuruuteen vaikuttaa mittausdatan integrointivirhe. Maksimivirheet ovat 4-7 %/s sinimuotoisissa kulman seuranta mittauksissa. Prosenttuaalista virhettä on vaikea sanoa, koska maksimivirheet tapahtuivat eri kohdissa mittauksia, jolloin kulmanopeus on eri. Translaation sinimuotoinen seurantamittaus sai maksimivirheeksi 0,4 g:tä eli 76 %. Virhe on prosentteina iso. Mitattuna suurena kuitenkin on kiihtyvyyden, jolloin isoja piikkejä voi tulla. Kiihtyvyydet ovat varsin isoja silloin, kun liikkuva alusta vaihtaa suuntaansa, ja maksimivirhekin on juuri tällaisessa kohtaa. Lisäksi kiihtyvyyden mittauksista häiritsevä jousitus, joka myös käännekohdassa lisää kiihtyvyyttä. Sinimuotoisissa mittauksissa ei tarkasteltu kuin maksimivirhettä, koska muita arvoja oli vaikea määrittää. Sinimuotoisissa kulman- ja translaatio seuranta mittauksissa käyrät seuraavat hyvin ohjaussignaalia.

Virheiden suuruuteen vaikuttaa moni asia, kuten valmistustarkkuus ja painopisteen sijainnin tarkkuus. Suurin vaikuttaja on kuitenkin toimilaitteen mallintaminen. Kaavan (16) kertoimet k_0 (N), k_1 (N/m) k_2 (Pa) määrittävät matemaattisen mallin kolmannen asteen polynomifunktioiden sopivuuden kuvassa 2.21 nähtyihin toimilaitteiden voima-paine-pituus-käyriin. Lisäksi toimilaitteessa tapahtuu hystereesiä, joka vaikuttaa myös asemointiin.

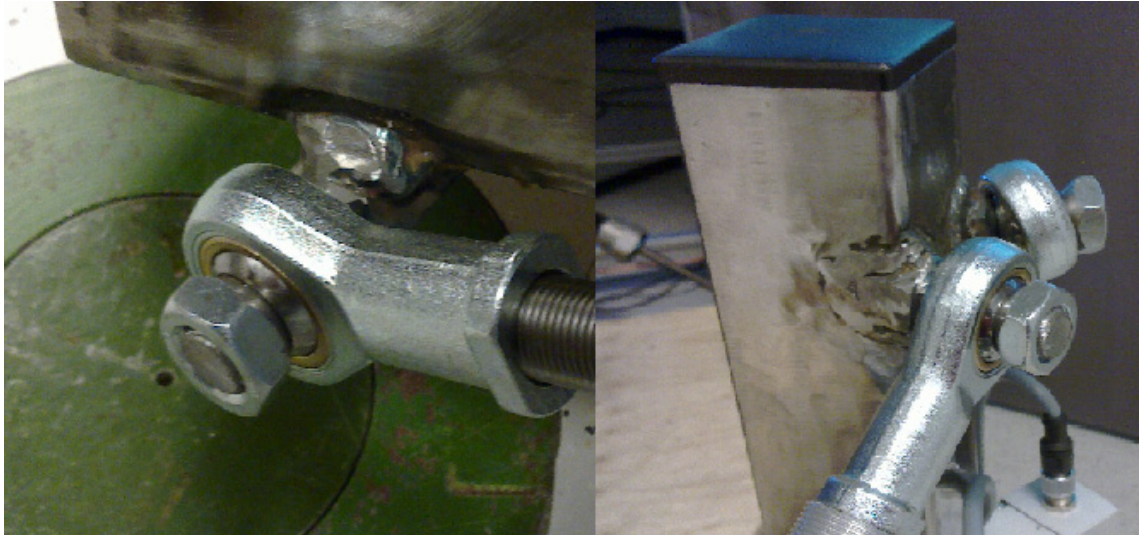
5. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli suunnitella liikealusta TTY:n virtuaalitilaan. Liikealustan tarkoituksena oli ensisijaisesti tuottaa liikkeitä Sandvikin Toro T7 kaivoslastari simulaattorille. Seuraavana on yhteenvetona muutamia merkittävimmistä ratkaisuksista ja mainitsemisen arvoisista asioista. Suunnittelun lähtökohtana oli edullisesti valmistettava pneumaattinen liikealusta. Suunnitteluun valittiin paljon standardiosia ja palkkeja, joiden ansiosta hankintahinta pysyy kohtuullisena. Toimilaitteiksi valittiin ilmalihakset, jotka ovat edullisia ja tuottavat paljon voimaa painoonsa nähden. Lisäksi suunnittelussa huomioitiin valmistusmenetelmät, jolloin laitteen valmistus on helppoa ja nopeaa.

Suunnittelun toinen pääasia oli, että liikealusta on helppo liikuttaa paikasta toiseen. Liikuteltavuutta helpottaa lihasten yksinkertainen kiinnitys ja perusosan saaminen kahteen palaseen. Perusosan liitos on myös nopea avata ja kiinnittää. Kuvassa 5.1 on esitetty liitos. Lisäksi toimilaitteiden kiinnitys kuvassa 5.2 on erittäin helppo ja nopea irrottaa. Näiden ansiosta purkaminen onnistuu nopeasti.



Kuva 5.1 Perusosan liitos.



Kuva 5.2 Toimilaitteiden kiinnitys ala- ja yläpäässä.

Liikealustan ohjaus toteutettiin avoimena, jolloin takaisinkytkentää ei tarvita. Näin säästytään anturointi kustannuksilta, ja ohjaus ja säätö yksinkertaistuvat. Avoimella ohjauksella liikealusta on uudenlainen sovellus. Venttiileiksi tämän takia piti valita paineproportinaaliventtiilit, jotka olivat kalliimmat, mutta mahdollisti avoimen ohjauksen.

Suunnittelussa jäätin toivotusta 10° maksimaalisista kulmista kaikkien akseleiden suhteen, mutta se ei haittaa. Liikealustan suorituskyky on riittävän hyvä. Liikealustan tuottamat liikkeet vastaavat liikkuvan työkoneen kiihtyvyyksiä ja kulmanopeuksia varsin hyvin. Myös kaivoslastarin kokeneet kuljettajat pitivät liikealustasta. Mutta liikealustan viive on melko suuri, jonka myös testikuljettajat huomasivat. Toivomuslistalla oli 250 ms viive ja nyt liikealustassa on kokonaisviive noin 400-500 ms. Isoissa liikkeissä tämä on ongelma, koska niiden toteutus kestää liian kauan. Toisaalta liikealusta reagoi jo noin 60-80 ms kohdalla joten liike oikeaan suuntaan on aloitettu, mutta liike pysähtyy noin 100 ms myöhässä.

Kaiken kaikkiaan suunniteltu pneumaattinen liikealusta soveltuu hyvin liikkuvien työkoneiden liikkeiden toteuttamiseen simulaattori ympäristössä.

LÄHTEET

- [1] Moorabbin Flying Service. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.2.2010]
Saatavissa: http://www.mfs.com.au/MFS_Motion_Platforms.htm
- [2] Avia Films. [Yrityksen kotisivu]. [Viitattu 20.2.2010]. Saatavissa:
<http://www.aviafilms.com/>
- [3] Rafael Åman. Hydraulisen kuristinmallin ja liikealustan ohjauksen kehittäminen reaaliaikasilmoointiin. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2007. 62 s.
- [4] Armadillo Aerospace. [Yrityksen kotisivu]. [Viitattu 20.2.2010]. Saatavissa:
<http://media.armadilloaerospace.com/misc/orientation.htm>
- [5] Nehaoua L., Arioui H., Espie S. ja Mohellebi H. Motion Cueing Algorithms for Small Driving Simulator. Teoksessa: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, held at Orlando, Florida, May 2006. S. 3189-3194.
- [6] Nehaoua L., Amouri A. ja Arioui H. Classic and Adaptive Washout Comparison for a Low-Cost Driving Simulator. Teoksessa: Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation, held at Limassol, Cyprus, 27-29 June, 2005. S. 586-591.
- [7] Mauri Airila. Mekatroniikka.Otatieto Oy, 1996. 4. painos. 426 s. ISBN 951-672-239-3.
- [8] Arizonan yliopisto. [Verkkodokumentti]. [Luentokalvot]. [Viitattu 20.2.2010]
Saatavissa: <http://www.u.arizona.edu/~pen/ame553/Notes/Lesson%2008-B.pdf>
- [9] In Motion Simulation. [Tuoteluettelo verkossa]. [Viitattu 20.2.2010] Saatavissa:
<http://www.inmotionsimulation.com/products.html>
- [10] Stewart, D., A platform with six degree of freedom, Proc.Institute of Mechanical Engineering, Vol. 180, Part 1, No. 5, pp. 371-386, 1965-1966.
- [11] Gough, V. E., Contribution to discussion of papers on research in Automobile Stability, Control and Tyre performance, *Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng.*, pages 392-394, 1956-1957.

- [12] Stoughton R. ja Arai T. A Modified Stewart Platform Manipulator With Improved Dexterity. IEEE transactions on robotics and automation, vol. 9, no. 2, April 1993.
- [13] Festo, Fluidic Muscle MAS, Festo Brochure, 2002
- [14] Schulte, R.A., The characteristics of the McKibben artificial muscle, In the Applications of External Power in Prosthetics and Orthotics. Publ. 874, Nas-RC, pp. 94–115, 1962
- [15] Chou, P., and Hannaford, B., Measurement and Modeling of a McKibben Pneumatic Artificial Muscles, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 1, Feb 1996.
- [16] Jouppila, V., Gadsden, A., Habibi, S., Bone, G. M., Ellman, A., Sliding mode controller and filter applied to a pneumatic McKibben muscle actuator, In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2009), 10 pages, Lake Buena Vista, USA 2009
- [17] C.-P. Chou and B. Hannaford, "Static and dynamic characteristics of McKibben pneumatic artificial muscles," Proceedings of ICRA, Vol. 1, pp. 281-286, 1994.
- [18] Jatek Oy. [Tuoteluettelo verkossa]. [Viitattu 4.4.2010]. Saatavissa: <http://www.jatek.fi/auto-osat/product/1478>
- [19] Salmi, Tapio: *Teknillisen mekaniikan perusteet*. Tampere: Klingendahl Paino Oy, 2006. ISBN 952-9835-80-9.
- [21] Sallinen, J., Eskola, T., Handroos, H., Design of a Motion Platform for a Mobile Machine Simulator by Utilizing 6-D Measurements and Inverse Dynamic Analysis, In Service Robotics and Mechatronics, Springer London, Part 7, pp. 149-152, 2009